

THESE

présentée

à l'Université d'Orléans

U.F.R. - Faculté des Sciences

pour l'obtention du titre de

Docteur-Ingénieur

en Matières minérales et énergétiques

option "Géochimie et prospection des ressources minérales"

par

Fatima LAGGOUN-DEFARGE

Ingénieur géologue
de l'Institut Algérien du Pétrole

ETUDE DE LA DIAGENESE ORGANIQUE DES SERIES PALEOZOIQUES DU BASSIN DE SBAA (ALGERIE). APPROCHE GEOCHIMIQUE ET PETROLOGIQUE

Soutenue le 11 décembre 1987 devant le jury :

MM J. TRICHET ----- Président

P. BERTRAND	} ----- Examineurs
P. ROBERT	
B. ALPERN	
C. SALLE	
V. PERTHUISOT	
J.-L. OUDIN	

إلى أحب وأغلى انسان لدي
كريسيا (عيسى) ؛ لن أنسى
بهذه المناسبة والديه ووالدي
الذين هبطوا في سبيل فوزنا
وسعادتنا...

PLAN DU MEMOIRE

Pages

<u>Avant-propos</u>	1
---------------------------	---

<u>INTRODUCTION</u>	5
---------------------------	---

• Présentation du sujet	6
• Historique de l'exploration pétrolière dans la région de Sbaa ...	6
• Présentation du mémoire	8

<u>PREMIERE PARTIE: GEOLOGIE DU BASSIN DE SBAA</u>	11
----------------------------------------------------------	----

<u>I- PRINCIPAUX ELEMENTS STRUCTURAUX ET SEDIMENTAIRES</u> <u>REGIONAUX</u>	12
--------------------------------------------------------------------------------------	----

<u>II- SITUATION GEOGRAPHIQUE</u>	14
-----------------------------------------	----

<u>III- STRUCTURE ET LITHOSTRATIGRAPHIE</u>	16
---------------------------------------------------	----

<u>III-1- Caractères structuraux</u>	16
--------------------------------------------	----

<u>III-2- Caractères lithostratigraphiques</u>	21
------------------------------------------------------	----

<u>IV- INTERPRETATION PALEOGEOGRAPHIQUE ET TECTONIQUE</u>	27
-----------------------------------------------------------------	----

**DEUXIEME PARTIE: CHOIX, SITUATION ET DESCRIPTION DES
SONDAGES. CHOIX ET PETROGRAPHIE DES ECHANTILLONS** 33

I- CHOIX, SITUATION ET DESCRIPTION DES SONDAGES 34

I-1- Choix et situation des sondages 34

I-2- Description des sondages 35

II- CHOIX ET PETROGRAPHIE DES ECHANTILLONS 35

II-1- Choix des échantillons 35

II-2- Pétrographie des échantillons 36

**TROISIEME PARTIE: PROTOCOLE EXPERIMENTAL ET RESULTATS DE
L'ETUDE GEOCHIMIQUE ET PETROLOGIQUE DU CONTENU ORGANIQUE
DES ECHANTILLONS** 41

A- PROTOCOLE D'ETUDE 42

I- ETUDE PETROLOGIQUE 42

I-1- Etude de lames minces au microscope polarisant 42

<u>1-2- Etude de sections polies et de concentrés</u>	
<u>densimétriques</u>	42
<u>1-2-1- Etude réflectométrique</u>	44
<u>1-2-2- Etude microspectrofluorimétrique</u>	44
<u>1-3- Etude palynologique</u>	45
<u>II- ETUDE GEOCHIMIQUE</u>	46
<u>II-1- Etude des roches brutes</u>	46
<u>II-1-1- Dosage du carbone organique</u>	46
<u>II-1-2- Pyrolyse Rock-Eval</u>	46
<u>II-2- Extraction chloroformique</u>	47
<u>II-3- Etude des bitumes</u>	47
<u>II-3-1- Séparation des différentes fractions de l'extrait</u>	47
<u>II-3-2- Analyse par chromatographie en phase gazeuse</u>	48
<u>II-4- Etude des kérogènes</u>	49
<u>II-4-1- Isolement du kérogène brut (KB)</u>	49
<u>II-4-2- Extraction chloroformique du kérogène brut (KB)</u> <u>et fractionnement de son extrait</u>	51
<u>II-4-3- Caractérisation du kérogène</u>	52
<u>II-4-3-1- Analyse élémentaire</u>	52

11-4-3-2- Pyrolyse Rock-Eval	52
11-4-3-3- Spectroscopie d'absorption infrarouge	53
11-4-3-4- Couplage pyrolyse-chromatographie en phase gazeuse	53
<u>III- ETUDE DES TASMANACEES DU SILURIEN</u>	54

B- RESULTATS OBTENUS

<u>I- INTRODUCTION A L'ETUDE DE LA MATIERE ORGANIQUE</u>	57
<u>II- MATIERE ORGANIQUE DES ROCHES MERES POTENTIELLES</u>	62
<u>II-1- Etude pétrologique</u>	62
<u>II-1-1- Description du cortège organique</u>	62
11-1-1-1- En lumière réfléchie	62
11-1-1-2- En lumière transmise	72
<u>II-1-2- Etude réflectométrique</u>	79
<u>II-1-3- Etude microspectrofluorimétrique</u>	79
11-1-3-1- Analyse spectrale des Tasmanacées	84
11-1-3-2- Altérations monochromatique et spectrale des Tasmanacées	88
<u>II-2 Etude géochimique</u>	90

11-2-1- Caractérisation des roches brutes	90
11-2-1-1- Teneurs en carbone organique	90
11-2-1-2- Pyrolyse Rock-Eval	93
<i>a) Commentaire des résultats bruts</i>	93
<i>b) Diagrammes I_H/I₀ et I_H/T_{max}</i>	98
11-2-2- Etude des kérogènes	112
11-2-2-1- Composition élémentaire (C,H,O,N,S)	112
11-2-2-2- Pyrolyse Rock-Eval	117
11-2-2-3- Spectroscopie d'absorption infrarouge	124
11-2-2-4- Couplage pyrolyse-chromatographie gazeuse	132
11-2-3- Etude des extraits chloroformiques des roches brutes et des kérogènes	134
11-2-3-1- Teneurs en extrait	134
<i>a) Roches brutes</i>	134
<i>b) Kérogènes</i>	134
11-2-3-2- Composition des extraits	139
<i>a) Roches brutes</i>	139
<i>b) Kérogènes</i>	139
11-2-3-3- Distribution des n-alcanes	143
III- MATIERE ORGANIQUE DES RESERVOIRS	146
111-1- Composition des huiles	146
111-2- Distribution des n-alcanes	146
IV- ETUDE DES TASMANACEES DU SILURIEN	149

QUATRIEME PARTIE: SYNTHESE ET INTERPRETATION DES RESULTATS

OBTENUS 161

I- ORIGINE ET DEGRE D'EVOLUTION DE LA MATIERE ORGANIQUE DU BASSIN DE SBAA 162

II- LOCALISATION DES ROCHES MERES EFFECTIVES ET CORRELATION AVEC LES HUILES DES RESERVOIRS 163

III- HYPOTHESES SUR L'AGE DES HYDROCARBURES FORMES 165

CONCLUSION GENERALE 167

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 171

ANNEXES

ANNEXE I- LOGS DE FORAGE

ANNEXE II- METHODES ANALYTIQUES

ANNEXE III- TABLEAUX DE RESULTATS

ANNEXE IV- LISTE DES FIGURES, TABLEAUX ET PLANCHES

AVANT-PROPOS

Monsieur le Professeur J. TRICHET, après m'avoir admise à suivre les enseignements du Diplôme d'Etudes Approfondies "Matières premières minérales et Energétiques" Option B, m'a témoigné sa confiance en acceptant le sujet de cette thèse, proposé conjointement par l'Institut Algérien du Pétrole (I.A.P.) et la Société Nationale du Transport et de l'Acheminement des Hydrocarbures (SONATRACH). En outre, il a accepté de juger cette thèse en tant que président de jury. Qu'il trouve ici l'expression de ma profonde gratitude.

Je tiens également à remercier Monsieur B. ALPERN qui m'a accueillie au Groupe d'Etudes des Combustibles Fossiles de l'Université d'Orléans et qui a assuré, dans un premier temps, la direction de cette thèse.

Monsieur P. BERTRAND a bien voulu prendre sa succession comme directeur de thèse et m'a prodigué de nombreux conseils durant les dernières étapes de mon travail. Je tiens à lui exprimer mes plus vifs remerciements et mon amitié.

Messieurs P. ROBERT et C. SALLÉ, en plus d'accepter de faire partie de ce jury, m'ont apporté une aide précieuse en ce qui concerne les interprétations géologiques. Que tous deux soient ici remerciés pour cela.

Je remercie également Messieurs J.-L. DUDIN et V. PERTHUISOT d'avoir bien voulu accepter de juger ce travail.

Côté algérien, je remercie Monsieur A. MEKARNIA (Chef du Département Géologie de l'I.A.P.) et, à travers lui, toutes les personnes de cet Institut qui ont participé, de près ou de loin, à ma formation et au soutien, scientifique et financier, de cette thèse; de même, je remercie Monsieur A. CHAOUICHE (Chef du Département Géochimie de la Direction du Laboratoire Central des Hydrocarbures de la SONATRACH) et, à travers lui, la SONATRACH, pour m'avoir autorisé à prélever et à acheminer vers la France les échantillons qui ont servi à cette étude, et pour m'avoir fourni les documents géologiques dont il est fait mention dans ce mémoire.

Par ailleurs, Monsieur S. BEUF du Bureau d'Etudes Industrielles et de Coopération de l'Institut Français du Pétrole (B.E.I.C.I.P.) m'a fait profiter de sa grande expérience de la géologie saharienne et je veux ici l'en remercier vivement, ainsi que ceux de ses collaborateurs qui ont complété certaines de mes cartes.

Je suis particulièrement reconnaissante à Monsieur B. DURAND, d'abord parce qu'il a été la personne qui m'a initiée à la géochimie organique (à l'I.F.P.), et ensuite, pour le soutien matériel et scientifique que j'ai reçu à l'Institut Français du Pétrole (I.F.P.), au sein du Département qu'il dirige, soutien sans lequel cette thèse ne serait pas ce qu'elle est. A travers lui, je voudrais également remercier :

Madame M. BERNON, pour ses nombreux conseils et son aide en ce qui concerne les analyses d'huiles et d'extraits;

Monsieur M. ESPITALIE, qui a analysé certains des kérogènes en pyrochromatographie;

Monsieur T. LESAGE, qui m'a aidée dans l'isolation des kérogènes;

Monsieur G. PICHARD, pour les analyses de kérogènes au Rock-Eval;

Madame M. SZYDLONSKI (Département de Physique de l'I.F.P.), qui a réalisé la spectroscopie infrarouge des kérogènes, et Madame M. FRÈRE, qui a servi d'intermédiaire entre nous;

Madame F. BEHAR, Mademoiselle C. MAGNIER et Messieurs J.-C. MONIN, R.Y. HUC et D. LERAT, pour leurs conseils et leur aide en ce qui concerne l'étude du concentré de Tasmanacées.

Je suis particulièrement reconnaissante à Madame G. FRAJANEL (Bureau de Recherches Géologiques et Minières d'Orléans) et à Monsieur R. COQUEL (Laboratoire de Paléobotanique et de Biostratigraphie du Paléozoïque de l'Université de Lille) pour m'avoir aidée à effectuer l'étude palynologique des échantillons.

Madame S. BONNAMY m'a fait l'amitié d'étudier le résidu de pyrolyse du concentré de Tasmanacées en microscopie électronique. Qu'elle soit ici remerciée.

Je veux également remercier Messieurs D. CLUZEL et G. PIERRE du Département de Géologie de l'Université d'Orléans pour m'avoir aidée dans l'étude des lames minces de roches au microscope polarisant. Ces lames ont été confectionnées par Mesdames Y. CHAUVETTE et F. CHAMPION (qui m'a apporté une aide constante tout au long de ma thèse), que je remercie toutes deux.

De même, Messieurs VAN DAMME et OBRECHT m'ont accueillie au Centre de Recherches sur les Solides à Organisation Cristalline Imperfekte d'Orléans (Centre National de la Recherche Scientifique) et m'ont aidée à confectionner les pastilles destinées à l'analyse par spectroscopie d'absorption infrarouge.

J'aurai une pensée particulière pour Mademoiselle A. BOURDEAU, qui a réalisé la plupart des dessins de ce mémoire. Qu'elle reçoive ici mes remerciements les plus vifs et l'expression de mon amitié.

A P. BERTRAND cité plus haut, j'associerai bien entendu les autres membres de l'Unité de Recherche en Pétrologie Organique au sein de laquelle j'ai fait ma thèse, c'est à dire, outre F. CHAMPION déjà citée, L. MARTINEZ, B. PRADIER et P. FOURMONT. Qu'ils soient infiniment remerciés pour l'amitié, l'aide et les conseils qu'ils m'ont prodigués tout au long de ce travail. J'espère avoir le plaisir de continuer à travailler avec eux à l'avenir.

Enfin, que tous mes collègues et amis du Département de Géologie de l'Université d'Orléans, et notamment ceux du Laboratoire de Géologie de la Matière Organique qui m'ont particulièrement aidée et soutenue, reçoivent toute mon amitié.

INTRODUCTION

- Présentation du sujet

Le sujet de la thèse présentée dans ce mémoire est l'étude géochimique et pétrologique de la diagenèse de la matière organique des séries paléozoïques du bassin de Sbaa. Ce bassin est situé dans la Province centre-occidentale du Sahara algérien (figure 1).

A la suite de la découverte, en 1980 (Cf. historique ci-dessous), de divers gisements d'huile dans ce bassin par la Société Nationale du Transport et de l'Acheminement des Hydrocarbures (SONATRACH), il a paru nécessaire à cette Société d'étudier l'origine de ces huiles par les méthodes de la géochimie et de la pétrologie organiques modernes; avec comme objectif évident d'appliquer la compréhension des conditions de formation, de migration et d'accumulation de ces hydrocarbures à l'exploration pétrolière dans cette région.

En effet, ce bassin pétrolier présente la particularité d'abriter les seuls gisements connus d'hydrocarbures liquides de la Province centre-occidentale du Sahara algérien, laquelle contient de nombreux gisements d'hydrocarbures gazeux (Berga, Zerafa, Tiguentour, Krechba, etc.). Un des principaux intérêts scientifiques de cette étude est d'aider à la compréhension de cette apparente "anomalie".

Au terme de cinq années d'études d'ingéniorat à l'Institut Algérien du Pétrole (I.A.P.), nous avons obtenu une bourse de formation pour étudier la géochimie et la pétrologie organiques à l'Université d'Orléans. Après une année de Diplôme d'Etudes Approfondies (1983/84) consacrée à l'étude du sondage "Haïad" de la dépression du Grand Erg Oriental (Algérie) au sein du Laboratoire de Géologie de la Matière Organique de cette Université, nous avons choisi de nous intéresser, à l'occasion de notre thèse, au bassin de Sbaa, en raison de son grand intérêt.

- Historique de l'exploration pétrolière dans la région de Sbaa

L'exploration pétrolière dans la région de Sbaa a débuté en 1953, à la suite de la découverte du gisement de gaz de Berga dans la partie nord de la dépression de l'Ahnnet (figure 3). Quelques forages ont alors été implantés sur la voûte d'Azzène qui était supposée avoir drainé des hydrocarbures du fait de sa situation structurale surélevée par rapport à la cuvette de Sbaa proprement dite (figure 4).

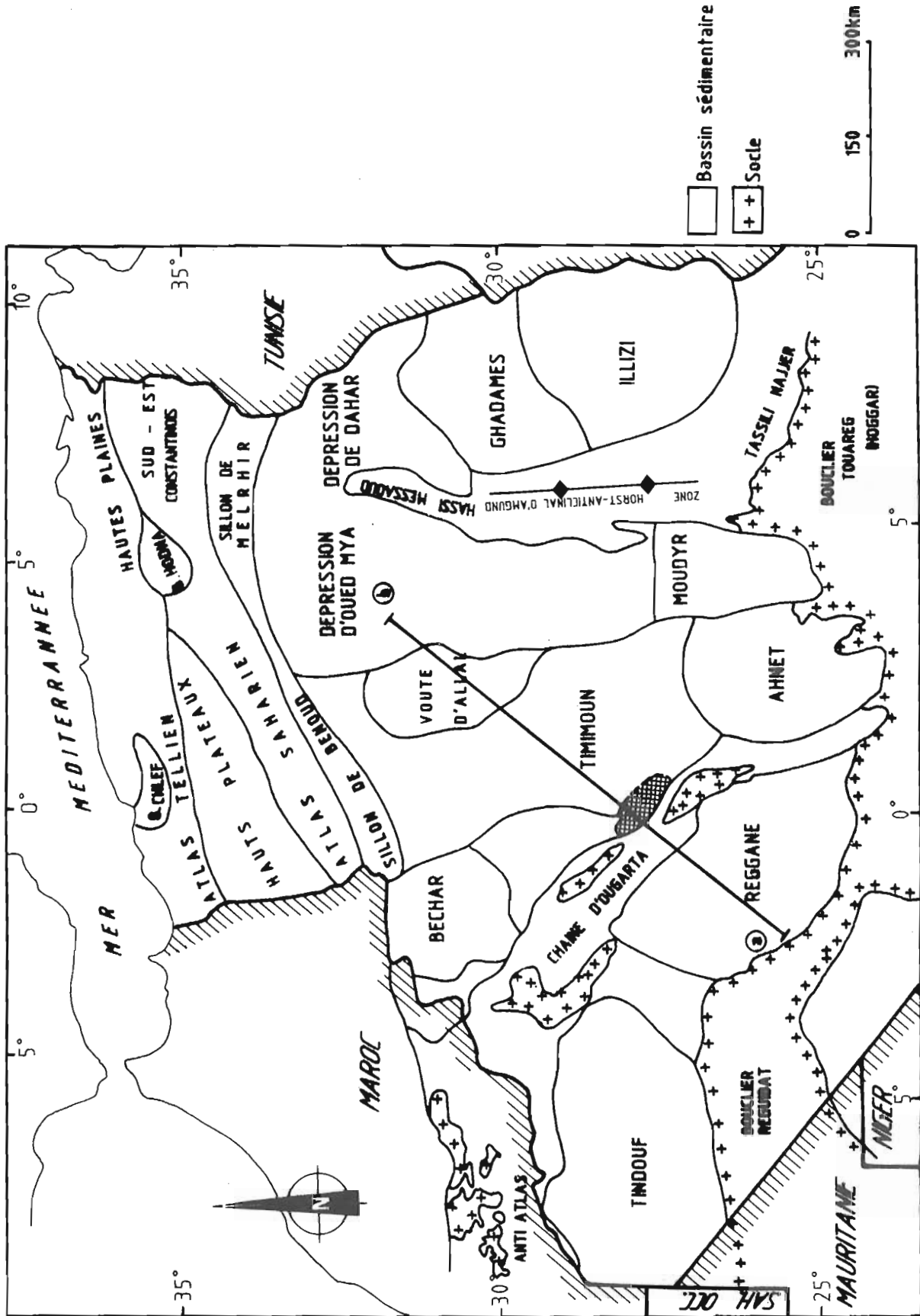


Fig. 1 : Principaux éléments structuraux de la plateforme Saharienne (d'après Anonyme, 1984)
La coupe a-b est représentée dans la figure 2.

En raison des résultats obtenus (les réservoirs trouvés s'avérant aquifères ou ne fournissant que quelques indices d'huile sauf au niveau du puits AZ-1) et de la découverte, entre 1953 et 1957, des importants gisements de Hassi Messaoud, Hassi R'Mel et du bassin d'Illizi (nécessitant la mise en oeuvre d'infrastructures considérables), cette région fut alors délaissée après ces premières investigations.

L'exploration ne fut reprise qu'en 1979, par la SONATRACH, sous la poussée de la demande croissante en énergie. Les profils sismiques effectués alors ont mis en évidence de nombreuses structures fermées ainsi que le biseautage de certaines formations. En 1980, le sondage Sbaa-1 (figure 5) a révélé une accumulation importante d'huile à la base du Tournaisien, c'est à dire à 500m de profondeur seulement (réserves prouvées: 22 millions de tonnes). Cette découverte a bouleversé l'hypothèse jusque-là admise postulant que les bassins du Sahara ouest étaient des provinces potentiellement gazéifères.

Le sondage Sbaa-3 (figure 5), effectué en 1981, a montré l'intérêt du Cambro-Ordovicien comme producteur de gaz. En 1983, un autre gisement d'huile a été découvert au sud de la région de Sbaa, à Hassi Ilatou (LT-1; figure 5), au niveau du Strunien (réserves prouvées: 17 millions de tonnes). En 1984, le sondage LT-1bis (figure 5) a confirmé l'importance du Cambro-Ordovicien, porteur d'une accumulation de gaz et de condensats. Enfin, un sondage récent (Touat-1; figure 5), implanté au nord-ouest du bassin, a permis la découverte d'huile au niveau du Tournaisien/Strunien.

• Présentation du mémoire

Le présent mémoire est composé, hormis la présente Introduction, en quatre parties:

* Dans la Première partie est présenté le cadre géologique de cette étude. Après une description structurale et lithostratigraphique du bassin de Sbaa, on y trouvera un essai de reconstitution de son histoire paléogéographique et tectonique à la lumière de ces descriptions et de données bibliographiques.

* La Deuxième partie est consacrée à la description des sondages et des échantillons étudiés, ainsi qu'à la justification de leur choix.

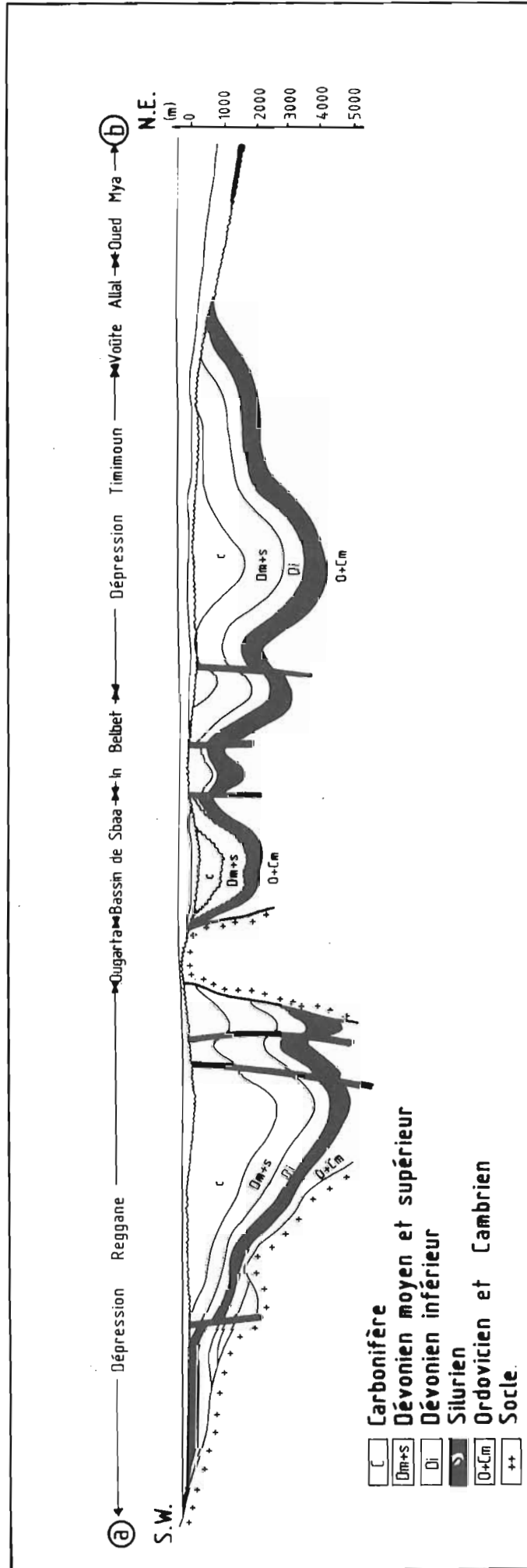


Fig. 2 : Coupe géologique schématique à travers le Sahara Occidental (d'après Anonyme 1984)
La situation de cette coupe est donnée dans la figure 1.

* Dans la Troisième partie sont présentés parallèlement, d'une part le protocole expérimental de l'étude géochimique et pétrologique du contenu organique des échantillons, et d'autre part les résultats obtenus par chacune des méthodes employées.

* L'interprétation et la synthèse de ces résultats font l'objet de la Quatrième partie, trois principaux aspects étant successivement abordés:

- + origine et degré d'évolution de la matière organique;
- + localisation des roches mères effectives et corrélation avec les huiles de réservoirs;
- + hypothèses sur l'âge des hydrocarbures formés.

* la Conclusion générale fait le point sur les connaissances acquises au terme de ce travail sur la diagenèse organique dans le bassin de Sbaa et répertorie les études qu'il serait nécessaire d'entreprendre pour en avoir une meilleure compréhension.

Remarque: le choix qui a été fait de présenter les résultats (de l'étude géochimique et pétrologique) et leur interprétation dans deux chapitres séparés se justifie par la nécessité d'une approche convergente (par le biais de plusieurs méthodes différentes) de chacun des problèmes abordés.

PREMIERE
PARTIE

*GEOLOGIE
DU BASSIN
DE SBAA*

• AVERTISSEMENT.

L'analyse des paramètres géochimiques des séries sédimentaires d'un bassin ne représente qu'une des nombreuses méthodes utilisées en exploration pétrolière. Le degré de maturation des roches mères, les époques de genèse des hydrocarbures, le type d'huile et de gaz généré, leurs quantités, etc., ne peuvent être interprétés qu'en fonction de toutes les autres données disponibles: stratigraphie, sédimentologie, histoire structurale du bassin.

Dans le cas de l'étude présentée dans ce mémoire, beaucoup de ces données ne m'ont pas été disponibles, aussi les interprétations et les conclusions sont sans doute incomplètes.

En effet, la SONATRACH est titulaire à 100% du permis de Gourara, dont fait partie le bassin de Sbaa. Un certain nombre d'informations sont donc considérées comme confidentielles par cette Société, et il ne m'a été possible d'avoir accès qu'à quelques-unes des études effectuées sur cette région.

Les documents dont j'ai pu disposer sont les suivants:

* des données pétrographiques et diagraphiques "brutes" de subsurface (logs de forages);

* un rapport de la SONATRACH (Anonyme, 1984) faisant un point actuel des connaissances géologiques sommaires et des résultats pétroliers sur la base de données sismiques et de forage;

* un mémoire de fin d'études de l'Institut Algérien du Pétrole (Zérizer, 1985) qui est un essai de détermination de la géométrie des corps sédimentaires des différentes unités de faciès du Carbonifère du bassin de Sbaa.

Nous avons donc été amenée à tenter de déduire la structure du bassin étudié des seules données de forage, en établissant deux coupes WNW-ESE (figures 6 et 7) et une coupe NNE-SSW (figure 8) évidemment très schématiques. Nous avons également essayé, à l'aide des mêmes données, de reconstituer l'histoire de l'enfouissement du bassin, en ce qui concerne l'Ordovicien (figure 10).

Naturellement, la prise en compte de tous les éléments structuraux fournis par les profils sismiques aurait permis une meilleure compréhension du style tectonique de la région, fort complexe d'après nos déductions (Cf. chapitre IV de la Première partie). Une reconstitution paléogéographique du bassin aurait alors pu en être déduite.

I- PRINCIPAUX ELEMENTS STRUCTURAUX ET SEDIMENTAIRES REGIONAUX

Ils sont représentés dans la figure 3 qui est un écorché antémésozoïque

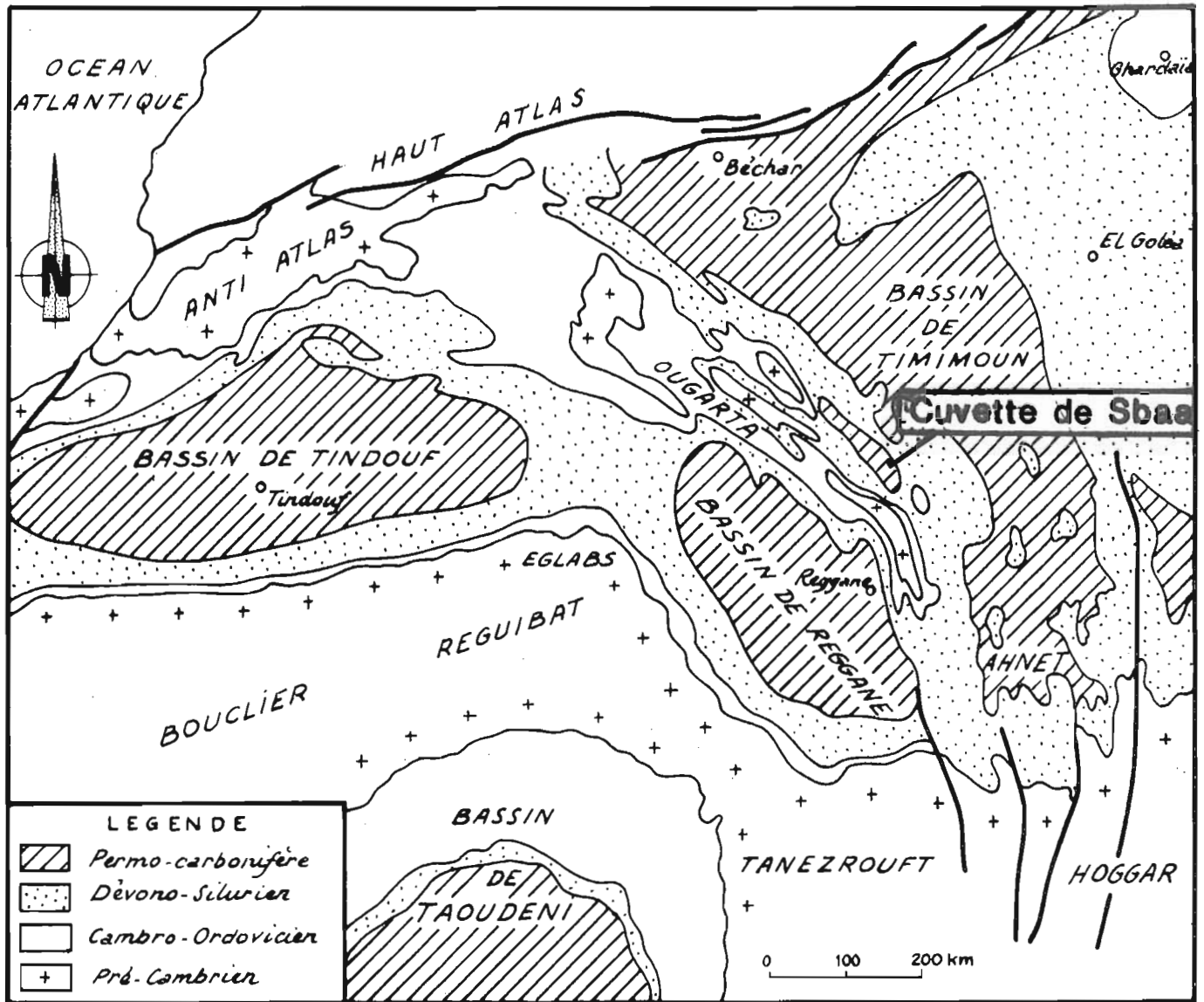


Figure 3 : Ecorché mésozoïque simplifié de l'ouest africain

simplifié de la partie occidentale du Sahara. On y distingue:

- * les affleurements du socle précambrien du bouclier Reguibat-Egalbs. Ce socle appartient au craton ouest-africain, partie relativement uniforme et stable de la plateforme saharienne;

- * le bassin intercratonique de Taoudeni au sud s'étendant surtout au Mali et en Mauritanie;

- * les bassins de Tindouf et Reggane, bassins périgratoniques dont les flancs sud (Tindouf) et sud-ouest (Reggane) s'appuient sur le bouclier des Egalbs. Sur ces zones, le Paléozoïque est mince, alors que vers le nord (Tindouf) ou le nord-est (Reggane), une subsidence importante pendant tout le Paléozoïque se traduit par des séries très épaisses. Ces deux bassins sont séparés par le seuil de Bou Bernous;

- * dessinant un vaste arc de cercle et s'étendant de l'Anti-Atlas au Maroc jusqu'au sud du bassin de l'Ahnnet, se développe la chaîne plissée de l'Ougarta qui limite au nord et au nord-est les bassins de Tindouf et de Reggane. Cette zone plissée est particulière: elle souligne la limite septentrionale du craton ouest-africain. Les épaisseurs de Paléozoïque inférieur (Cambro-Ordovicien) augmentent considérablement du sud (Ahnnet) au NW (Maroc). Cet ancien "sillon intracratonique" a été relevé et plissé à la fin du Paléozoïque (mouvements hercyniens), mais des mouvements mésozoïques ont dû contribuer également à sa structure actuelle;

- * la chaîne de l'Ougarta, qui dessine une série de plis décakilométriques (anticlinaux et synclinaux), forme la limite occidentale d'un très vaste bassin: Ahnet-Timimoun;

- * à ces éléments structuraux majeurs s'en ajoutent d'autres, de taille plus réduite; le bassin de Sbaa est l'un d'eux.

II- SITUATION GEOGRAPHIQUE

Le bassin de Sbaa s'étend dans la partie sud-ouest du bassin de Timimoun, qui fait partie, avec le bassin de l'Ahnnet-Mouydir, de la province centre-occidentale du Sahara algérien (figure 3). Il est limité par les chaînes de l'Ougarta à l'ouest et, à l'est, par l'anticlinorium d'In Belbel sur lequel vient s'appuyer la voûte d'Azzène (figure 2 et 4).

Il comprend deux principaux éléments structuraux:

- * un sillon étroit, d'une longueur maximale de 60 km environ, allongé dans la direction NW-SE: la cuvette de Sbaa proprement dite.

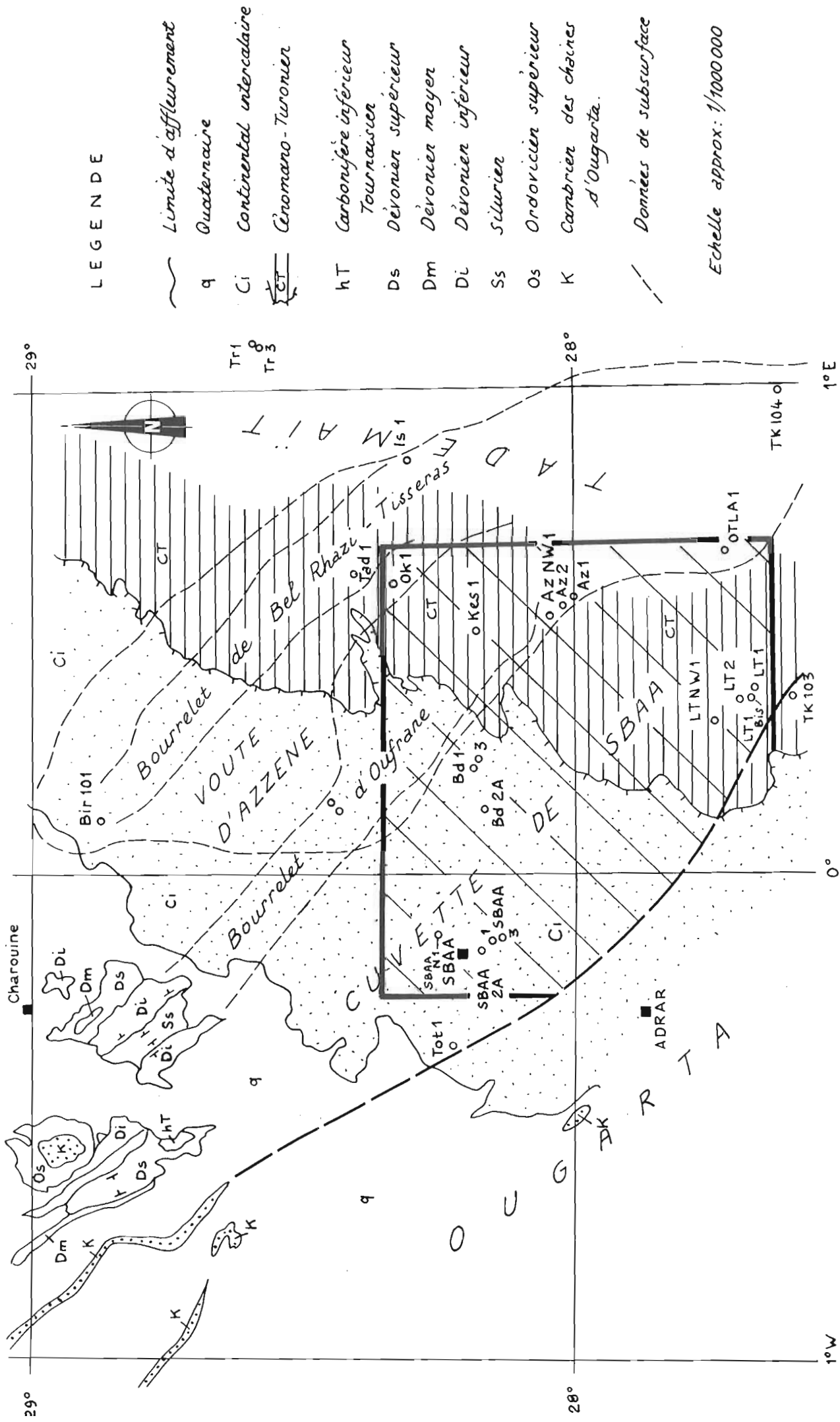


Fig.4 Localisation de la zone étudiée au sein du bassin de Sbaa

La plus grande partie de cette cuvette est recouverte de terrains quaternaires, de Crétacé continental ("continental intercalaire") ou marin (Cénomano-Turonien), comme on le voit dans la figure 4.

Cependant, au NNW, les affleurements de la région de Charouine montrent la présence d'un synclinal de Dévonien qui peut représenter la terminaison de la cuvette de Sbaa (structure synclinale). Au sud de Charouine, les affleurements paléozoïques tels que représentés dans la figure 4 pourraient appartenir au bourrelet d'Oufrane.

Au sud-ouest (région d'Adrar), le Cambro-Ordovicien, le socle et les séries intermédiaires des chaînes de l'Ougarta sont recouverts par du "continental intercalaire". Ces terrains ont subi une érosion importante avant le Crétacé.

* une zone haute orientée parallèlement au sillon: la voûte d'Azzène (figure 5).

Notons que nous avons choisi de réunir sous le terme "bassin de Sbaa" la cuvette de Sbaa et la voûte d'Azzène car elles s'individualisent au sein de la province centre-occidentale du Sahara algérien aux points de vue paléogéographique, structural et surtout pétrolier (figure 2).

La partie du bassin étudiée à l'occasion de cette thèse se situe aux environs de la ville d'Adrar; elle est limitée par les méridiens 0°30W et 0°45E et les parallèles 27°30 et 28°30 de latitude nord (figure 4).

III- STRUCTURE ET LITHOSTRATIGRAPHIE

III-1 Caractères structuraux

Le schéma structural établi à partir des interprétations sismiques (rapport interne SONATRACH: Anonyme, 1984) et des données de forage a les principaux caractères suivants:

* une direction dominante NW-SE appelée "direction ougartienne". Deux autres directions, mineures (NE-SW et E-W), sont révélées par les cartes d'interprétation sismique;

* des structures anticlinales étroites s'appuyant généralement sur des failles dont la direction est parallèle à celle de leurs axes; ces failles, nombreuses, compartimentent ces anticlinaux en blocs. Des structures synclinales larges et beaucoup moins faillées;

* des failles normales et inverses de rejet variable, affectant parfois toute la série lithostratigraphique. Les cartes d'isochrones et les profils sismiques montrent que certaines de ces failles peuvent changer de direction et parfois même de nature.

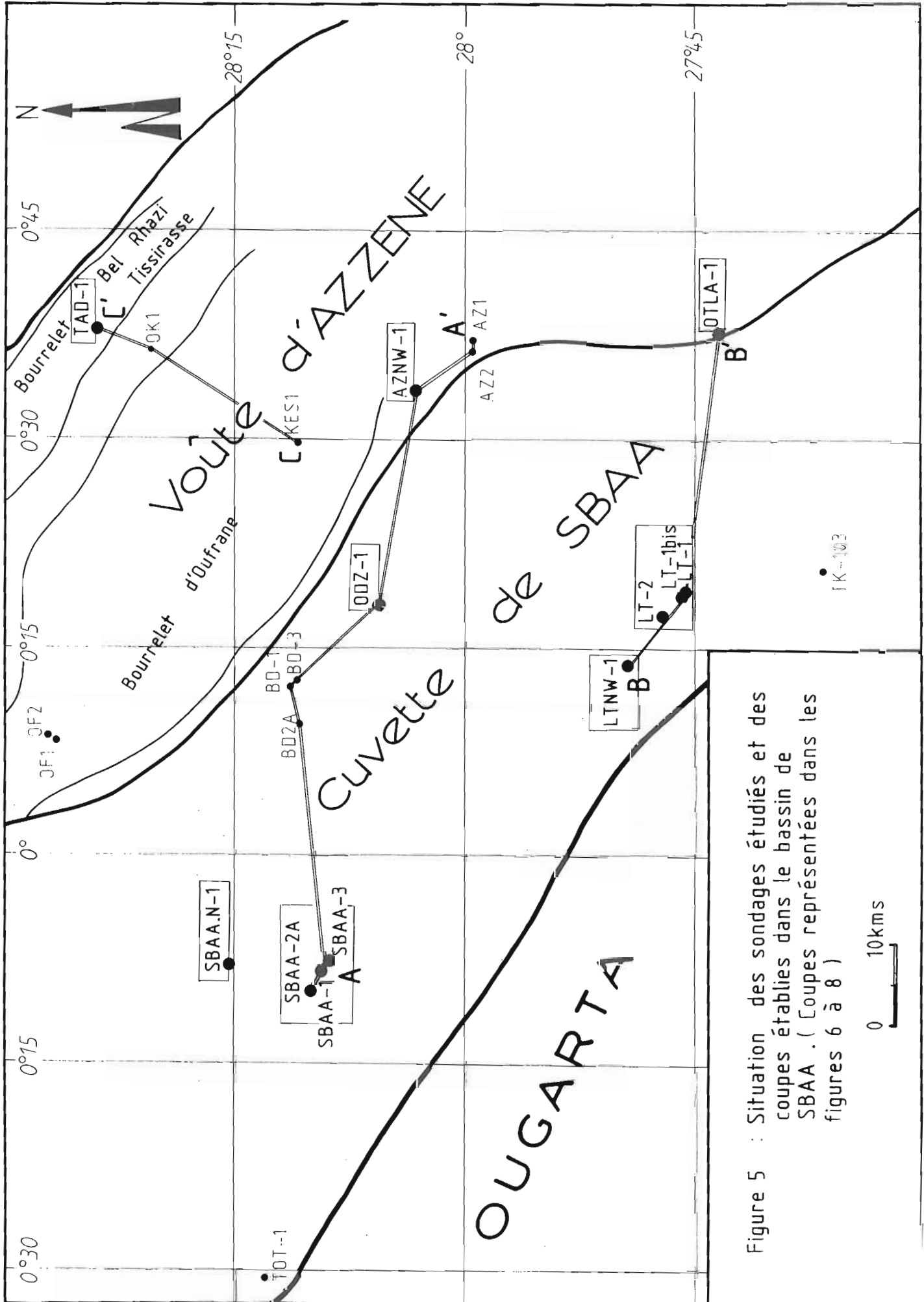


Figure 5 : Situation des sondages étudiés et des coupes établies dans le bassin de SBAA. (Coupes représentées dans les figures 6 à 8)

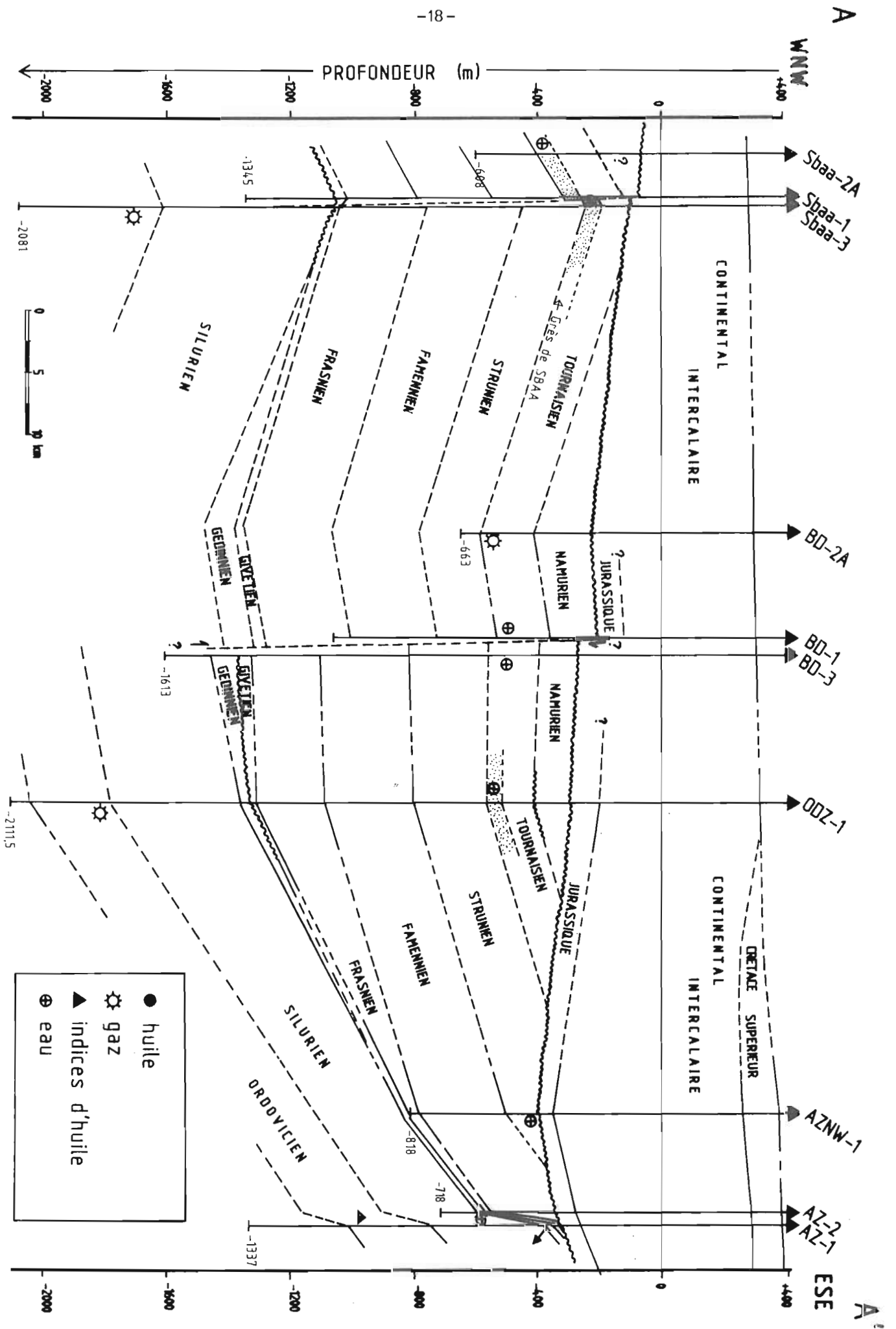


Figure 6 : Coupe géologique schématique au Nord du Bassin de Sbaa et résultats pétroliers .

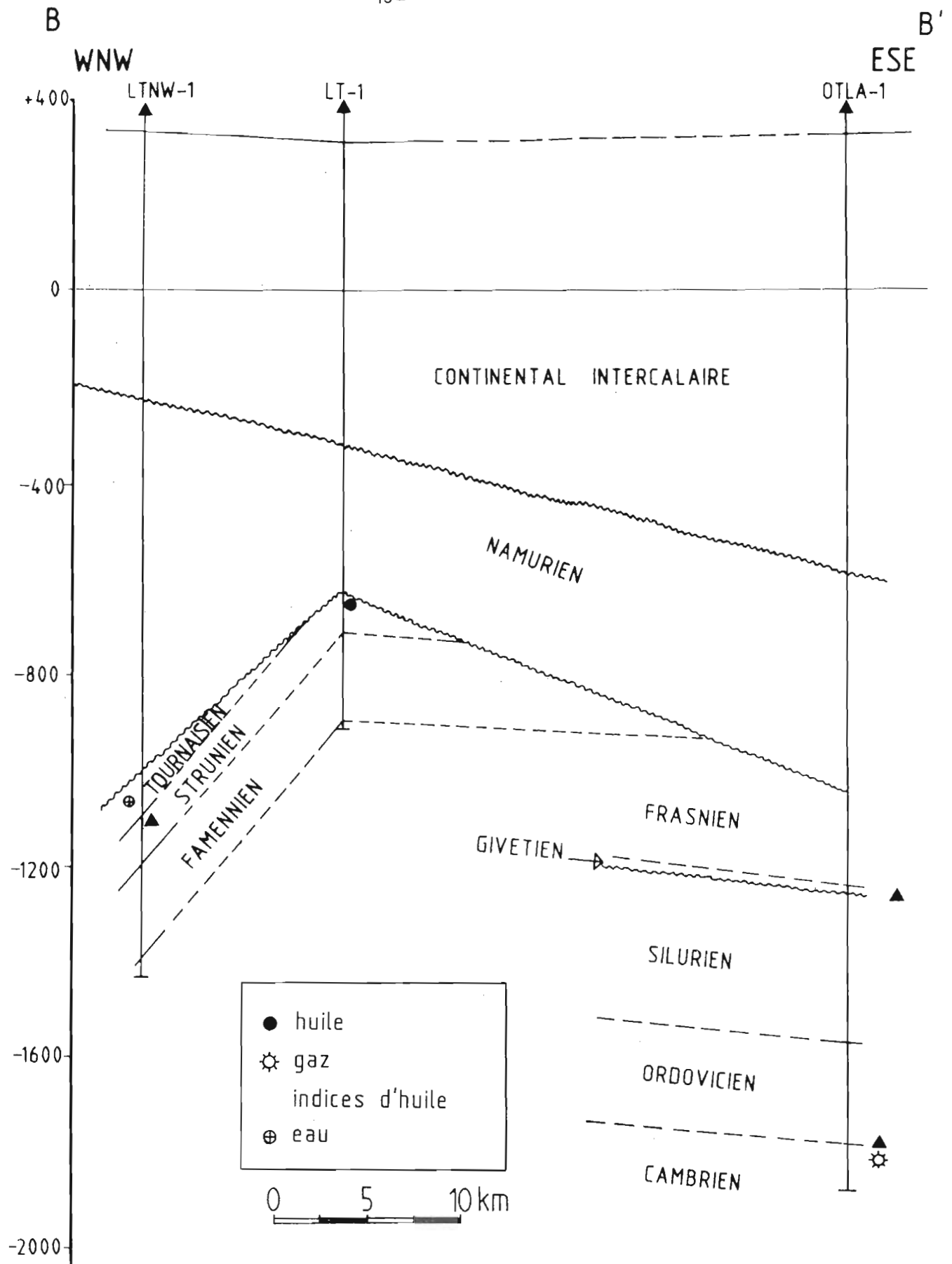


Figure 7 : Coupe géologique schématique au Sud du bassin de Sbaa et résultats pétroliers .

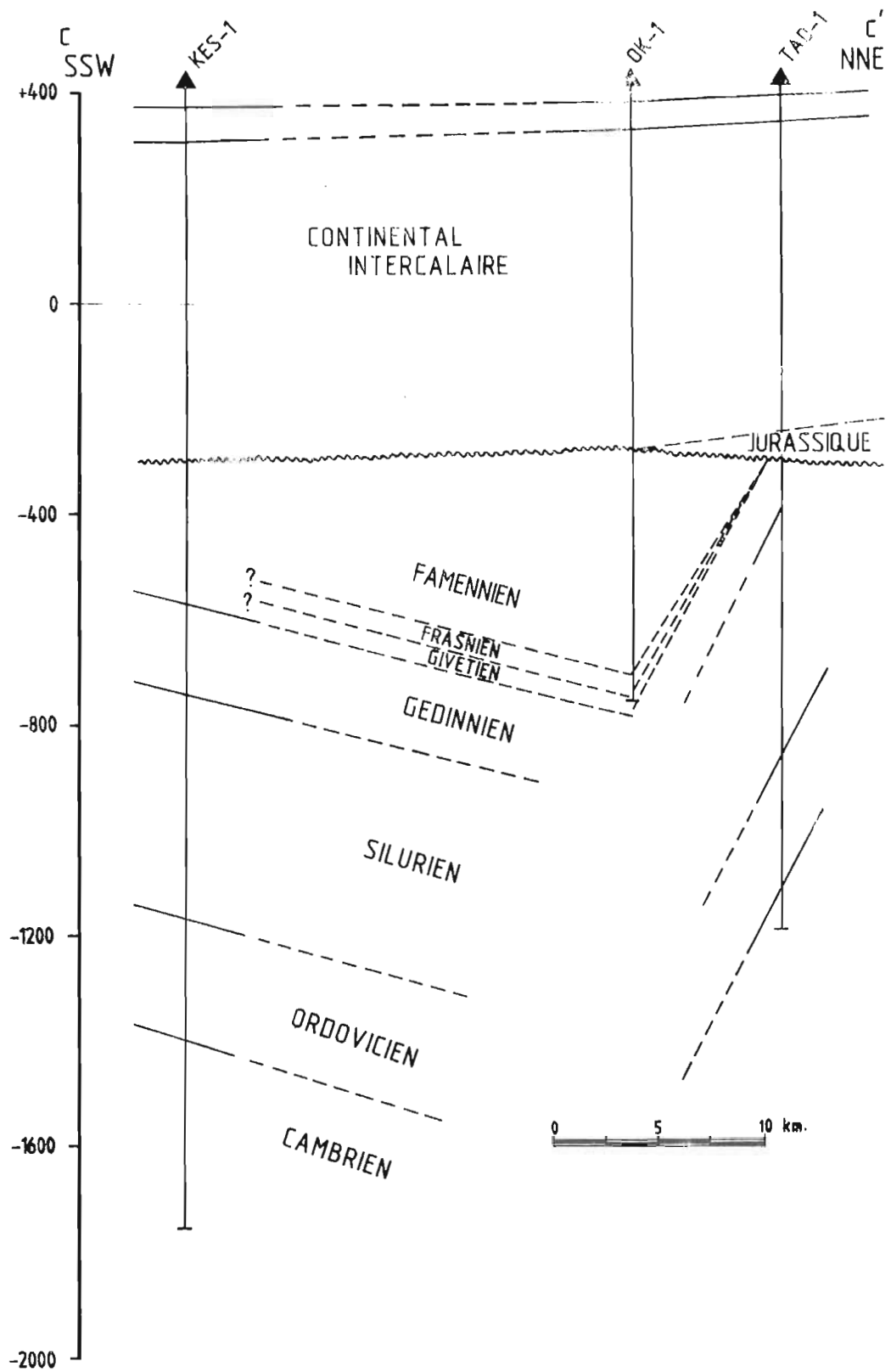


Fig. 8 : Coupe géologique schématique au niveau de la voûte d'Azzène

III-2 Caractères lithostratigraphiques

Dans ce paragraphe sera décrite la lithologie des différentes séries rencontrées dans le bassin de Sbaa et son interprétation en termes de milieux de dépôt. En l'absence de critères palynologiques et paléontologiques, l'attribution stratigraphique de ces séries a été faite à partir de corrélations diagraphiques et de limites purement lithologiques connues sur l'ensemble de la plateforme saharienne.

La série lithostratigraphique type du bassin, représentée dans la figure 9, présente les caractères suivants:

• LE PALEOZOIQUE:

+ Cambro-Ordovicien:

Dans l'ensemble, ce sont des formations gréseuses, présentant peu de variations d'épaisseur sur l'ensemble du bassin (214m à OTLA-1; 255m à AZ-1; 258m à ODZ-1). En l'absence de critères palynologiques, il n'a pas été possible de différencier les terrains revenant à chacune de ces deux périodes, sauf pour certains puits. La subdivision de cet ensemble en trois unités lithostratigraphiques a cependant pu être déduite des distinctions terminologiques établies par les Sociétés pétrolières ayant travaillé sur la région (Beuf et al., 1971).

* L'Unité II (épaisse de 100m environ) est constituée à la base par des grès grossiers à conglomératiques, mal classés, à stratifications obliques et entrecroisées. Ces grès, dont l'origine est attribuée à des dépôts fluviatiles (Beuf et al., 1971), passent progressivement vers le sommet à des formations argilo-gréseuses littorales (disparition des stratifications entrecroisées).

* L'Unité III (épaisse de 70m environ) est composée d'alternances d'argiles et de grès caractérisées par l'abondance de Tigillites. Cette formation, déposée dans un environnement marin, paraît transgressive sur les terrains sous-jacents (Beuf et al., 1971).

* L'Unité IV (d'épaisseur variable, 90m en moyenne) est un complexe gréso-argileux, souvent conglomératique, correspondant à un faciès de remplissage de paléovallées glaciaires (Beuf et al., 1966; Beuf et al., 1971).

+ Silurien:

Cette période correspond à la transgression de la fin de la période glaciaire précédente. Il se présente sous son faciès typique rencontré sur l'ensemble de la plateforme saharienne: importante série argileuse, avec des argiles à Graptolites et radioactives (constituant un bon repère diagraphique) à la base, puis des argiles noires parfois micacées et silteuses; des bancs de calcaire apparaissent au sommet.

COUPE LITHOSTRATIGRAPHIQUE SYNTHETIQUE DE LA CUVETTE DE SBAA

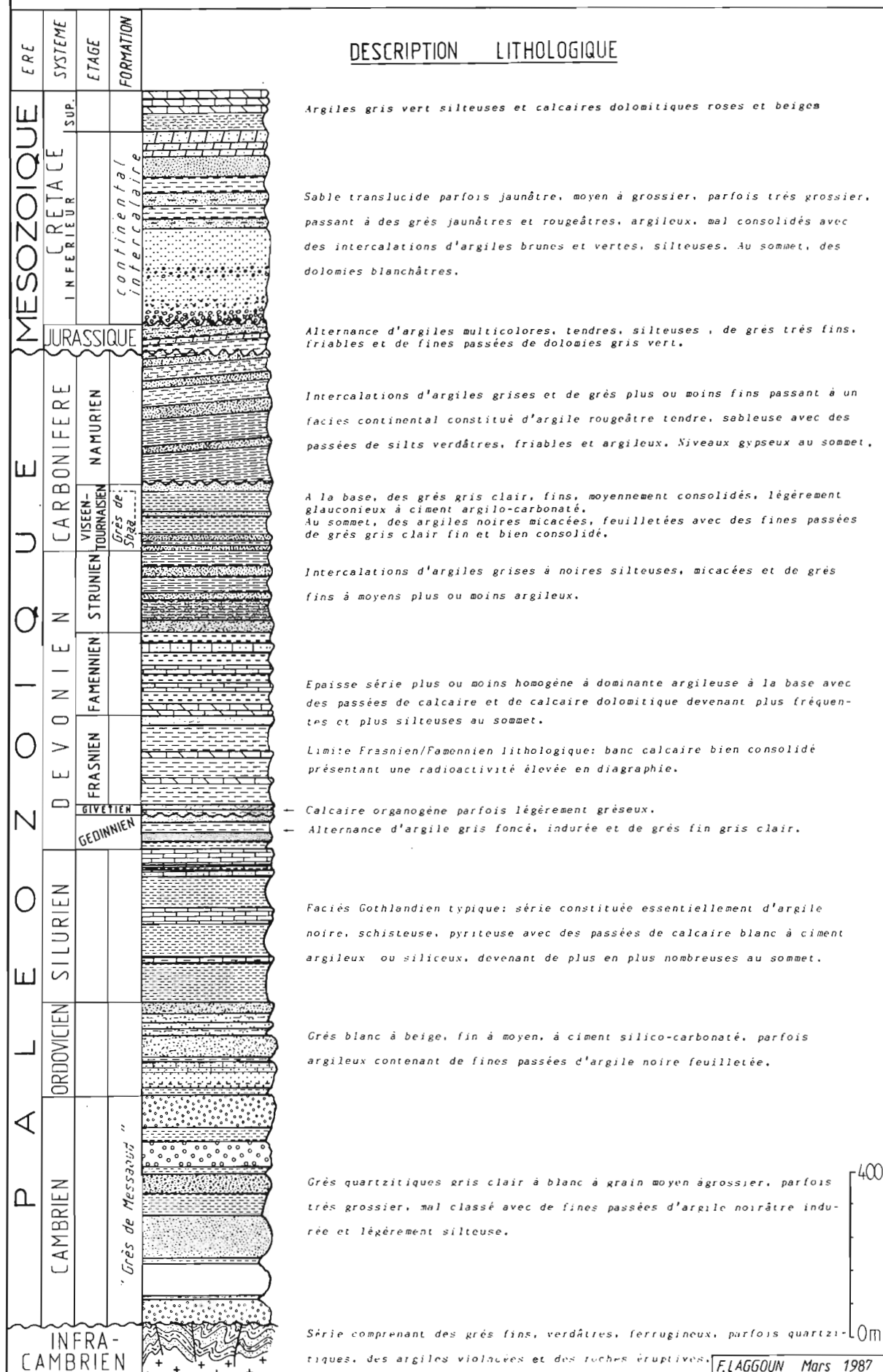


Figure 9

L'extension de cette formation au Sahara central et occidental est considérable, sans variations de faciès notables. Nous pouvons en déduire l'installation d'un régime franchement marin à cette époque (Beuf et al., 1966).

Nous constatons cependant, localement, une variation d'épaisseur du nord vers le sud: 540m à Sbaa-3; 410m sur la voûte d'Azzène; seulement 330m à OTLA-1).

+ Dévonien inférieur:

Cette époque n'est représentée que par le Gédinnien avec une épaisseur maximale de 90m à Bd-3. A l'échelle du bassin, ce niveau est assez mal connu et présente de grandes variations d'épaisseur; au sud, il est totalement absent.

Il se compose d'une alternance d'argiles grises et de grès argileux.

L'extension limitée et les variations d'épaisseur de cet étage, ainsi que l'absence de termes supérieurs suggèrent deux hypothèses:

- * soit une lacune de sédimentation suite à une émergence due aux mouvements de la phase Calédonienne;

- * soit un dépôt de terrains supérieurs suivi de leur érosion par suite des mêmes mouvements.

+ Dévonien moyen:

Cette formation est caractérisée par une sédimentation essentiellement carbonatée et par la diminution des éléments terrigènes par rapport au Dévonien inférieur. Elle est constituée par des calcaires organogènes avec de fines intercalations d'argiles noires légèrement gréseuses. Son épaisseur ne dépasse pas 40m. Elle repose généralement en discordance sur le Gédinnien et parfois même sur le Silurien.

+ Dévonien supérieur:

Cette époque est représentée par le Frasnien, le Famennien et le Strunien, ce dernier marquant le passage du Dévonien au Carbonifère.

Le Frasnien, caractérisé par une alternance d'argiles (avec quelques passées carbonatées) et de grès, présente une épaisseur relativement constante sur l'ensemble du bassin.

Les faciès du Famennien, marins peu profonds, sont identiques aux précédents. La limite stratigraphique entre ces deux niveaux est purement lithologique: c'est un banc de calcaire bien consolidé, présentant une radioactivité élevée en diagraphie.

Le Strunien est caractérisé par des épaisseurs très variables: 280m à

Sbaa-3 et au nord; 97m à LTNW-1 et au sud. Il présente un faciès de dépôt de plateforme peu profonde (Zérizer, 1985): alternance d'argiles gris noir silteuses et de grès fins avec de nombreuses traces de bioturbation. Le sommet de cette série présente une augmentation de la fréquence des événements gréseux.

+ Carbonifère inférieur:

Cette époque débute par une importante formation gréseuse entrecoupée d'un banc d'argiles d'environ 10m d'épaisseur. Cet ensemble détritique de 50m d'épaisseur présente les caractéristiques d'un faciès marin (présence de glauconie) déposé près de sa source: aucun granoclassement observé, grains de quartz anguleux, etc. Il est appelé "Grès de Sbaa" et constitue le réservoir principal de la région de Sbaa. Cette formation est surmontée d'un ensemble argileux passant au sommet à des grès homogènes parfois localement érodés lors de la phase appelée localement "intra-carbonifère".

On ne rencontre généralement que le Tournaisien, le Viséen étant souvent érodé. L'épaisseur totale du Carbonifère inférieur diminue du nord-ouest (280m à Sbaa-2A) au sud-est (89m à LTNW-1). Il est absent sur la voûte d'Azzène.

+ Carbonifère supérieur:

Cette formation présente à la base un faciès marin composé d'argiles grises avec de fines intercalations gréseuses passant au sommet à un faciès continental constitué d'argiles rougeâtres tendres et sableuses contenant des traces de gypse.

Cet ensemble, dernier terme de la série paléozoïque rencontrée dans le bassin, est daté Namurien. Il repose toujours en discordance sur les formations sous-jacentes (Tournaisien, Strunien et même Frasnien). Son épaisseur augmente de manière relativement importante du Nord (90m à Bd-3) vers le Sud (786m à LTNW-1).

• LE MESOZOIQUE:

Les formations mésozoïques du bassin de Sbaa constituent une série peu épaisse, incomplète, mal datée et reposant en discordance sur les terrains primaires.

A la base, on trouve des argiles multicolores intercalées de grès très fins friables et de fines passées dolomitiques. Cette formation est attribuée au Jurassique et présente une épaisseur de 50 à 90 mètres.

Des dépôts franchement continentaux, reposant en discordance sur le Jurassique, recouvrent l'ensemble du bassin. Ils sont appelés localement "continental intercalaire". Ce sont des sables grossiers à très grossiers, intercalés d'argiles multicolores et de dolomies. Ils présentent leur épaisseur maximale sur la voûte d'Azzène (jusqu'à 900m à OTLA).

10- INTERPRETATION PALEOGEOGRAPHIQUE ET TECTONIQUE

Afin de comprendre l'histoire géologique du bassin de Sbaa et notamment l'ensemble des mouvements tectoniques responsables de sa structuration et de son individualisation au sein de la Province centre-occidentale du Sahara algérien, il est nécessaire de retracer son évolution paléostructurale.

Pour cela, il aurait fallu que nous disposions de données structurales précises sur le socle et la couverture sédimentaire. Faut de ces renseignements (voir Avertissement au début de cette partie), nous avons essayé d'approcher l'histoire géologique de ce bassin par la reconstitution de l'enfouissement maximum des formations à l'aide des épaisseurs fournies par les sondages.

Nous avons ainsi tracé la courbe, représentée dans la figure 10, donnant la profondeur de la base de l'Ordovicien en fonction du temps, depuis son dépôt jusqu'à l'actuel. Notons qu'il aurait été préférable de faire cette reconstitution en ce qui concerne la base du Cambrien; malheureusement, cette formation n'est jamais traversée entièrement par les forages effectués dans le bassin (voir Annexe 1).

Pour tracer cette courbe, nous avons fait correspondre, à chaque fin de période géologique, les épaisseurs cumulées des formations déposées antérieurement (cette période comprise). Il n'a pas été tenu compte de la compaction, les épaisseurs choisies pour les différentes formations étant leurs épaisseurs maximales actuelles rencontrées dans le bassin. Jusqu'au Tournaisien compris, les épaisseurs maximales se rencontrent dans la région de Bou Hadid (sondages BD de la figure 6); pour le Namurien, dans la région sud de la cuvette de Sbaa (sondage LTNW-1 de la figure 7).

Cette courbe nous permet de distinguer 4 périodes dans le Paléozoïque, suivant le taux de subsidence des sédiments (figure 10): 2 périodes relativement calmes (périodes 1 et 3) et 2 périodes à fort taux de subsidence avec un contrôle structural (périodes 2 et 4).

- Période 1: Ordovicien

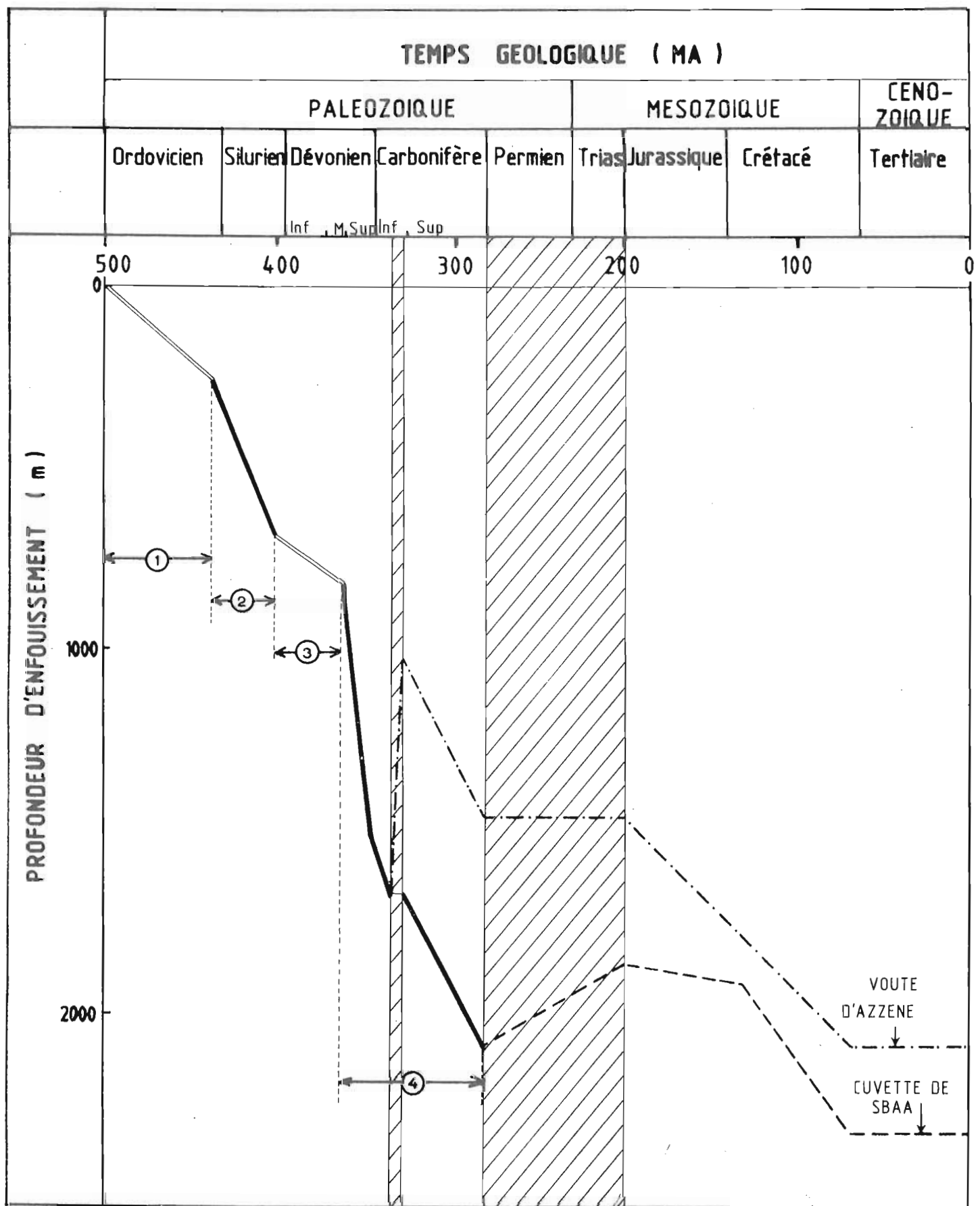


Fig. 10 : Principales étapes de l'enfouissement de la base de l'Ordovicien en fonction du temps géologique dans le bassin de Sbâa

Comme il a été précisé dans le paragraphe III-2 ci-dessus, la fin de cette période (Ordovicien supérieur) correspond à des dépôts de grès dans un environnement glaciaire. Ces sédiments se sont déposés sur une immense plateforme connue pour sa stabilité (Beuf et al., 1971). Ceci explique le faible taux de subsidence observé dans la figure 10.

- Période 2: Silurien

Comme il a été précisé dans le paragraphe III-2 ci-dessus, cette période correspond à l'installation d'un régime franchement marin. La cause du fort taux de subsidence donné par la figure 10 demeure inconnue à l'heure actuelle.

- Période 3: Dévonien inférieur et moyen

Comme il a été précisé dans le paragraphe III-2 ci-dessus, la période allant du Siegénien au Couvinien n'est pas représentée dans les sédiments du bassin de Sbaa. Dans le cas où cette absence serait due à une érosion après dépôt (voir paragraphe III-2 ci-dessus), le taux de subsidence donné par la figure 10 pour la période 3 serait sous-estimé.

De la même manière, les profondeurs d'enfouissement estimées pour la période 4 (voir ci-dessous) seraient, dans le cas où une telle érosion se serait produite, sous-évaluées.

- Période 4: Dévonien supérieur et Carbonifère
(Tournaisien et Namurien)

Comme il a été précisé dans le paragraphe III-2 ci-dessus, le Dévonien supérieur et le Tournaisien correspondent à des dépôts en milieu marin peu profond. Le fort taux de subsidence observé pour cette période (figure 10) semblerait traduire l'amorce des mouvements de la phase hercynienne.

Pendant la période du Viséen, il y a eu soulèvement de la région sud de la voûte d'Azzène et érosion pouvant même affecter parfois le Frasnien comme nous le montrent la courbe de subsidence de la figure 10 et la coupe géologique de la figure 7.

Le Namurien correspondant à des dépôts épicontinentaux à marins francs (voir paragraphe III-2 ci-dessus) voit la reprise de la subsidence dans l'ensemble du bassin juste avant la phase paroxysmique des mouvements hercyniens (voir la figure 10).

Au total, la courbe de subsidence de la figure 10 (parallèlement à la coupe géologique donnée dans la figure 2) semble indiquer que le bassin de Sbaa est

resté, tout au long du Paléozoïque, en position structurale haute (haut-fond), ce qui est en accord avec l'hypothèse avancée par la SONATRACH (Anonyme, 1984). Cette hypothèse postule par ailleurs que ce sont des mouvements du socle qui seraient responsables de ce maintien en position haute, et qui marqueraient donc le début de l'histoire tectonique de ce bassin.

Dès la fin du Dévonien supérieur, il semblerait que la sédimentation soit très influencée par la morphologie et la tectonique du bassin; on observe, en effet, des variations latérales brusques de faciès et d'épaisseur (voir figures 6, 7 et 8 et Annexe 1).

A la fin du Paléozoïque, les mouvements de la phase hercynienne vont tracer les grands traits structuraux de ce bassin avec:

- * une phase hercynienne "précoce", dite "intra-Carbonifère", à la fin du Tournaisien. Cette phase est caractérisée par une surrection de la partie sud du bassin comme le montrent les figures 7 et 10.

- * à la fin du Carbonifère inférieur et au Namurien, un basculement inverse se traduisant par un affaissement important de la partie sud du bassin (figures 7 et 10).

- * une phase hercynienne "majeure", connue à l'échelle de la plateforme saharienne. Cette phase de compression pourrait avoir joué un rôle déterminant dans l'individualisation du bassin par le biais du plissement des chaînes de l'Ougarta. En effet, la phase principale de plissement de ces chaînes se situerait vers la fin du Westphalien (Alimen et al., 1952); cette phase serait donc la phase asturienne.

L'absence totale du Trias et la sédimentation sableuse et gypsifère du Jurassique et du Crétacé témoignent de l'installation, au Mésozoïque, d'un régime "semi-continentale" dans la région, avec un taux de subsidence relativement faible (figure 10). D'autre part, les coupes géologiques des figures 6 et 7 (établies sur la seule base de corrélations entre puits) montrent que la discordance hercynienne est déformée et parfois affectée par des failles; ceci tendrait à prouver l'existence, dans le bassin de Sbaa, de phases tectoniques mésozoïques sur lesquelles nous n'avons aucune information.

Du point de vue thermique, le bassin de Sbaa, en raison de sa profondeur d'enfouissement maximale relativement faible (figure 10) et de sa position structurale haute durant tout le Paléozoïque, n'a probablement pas été le siège de manifestations thermiques importantes pendant cette ère.



Figure 11 : Principaux axes de subsidence dans le Sahara algérien (d'après Robert, 1971)

Par ailleurs, la reconstitution des axes de subsidence maxima au Paléozoïque dans le Sahara algérien (Robert, 1971) nous montre que ceux-ci sont grossièrement parallèles, dans la Province centre-occidentale, à la direction (NW-SE) des chaînes de l'Ougarta (figure 11), celles-ci constituant une fosse intracratonique profonde tout au long du Paléozoïque. D'après le même auteur, ce phénomène se retrouve dans les bassins avoisinants (Timimoun, Ahnet et Béchar).

D'autre part, le même auteur (Robert, 1976) affirme que "lorsque la phase de distension est suivie d'une phase de compression, le phénomène thermique majeur *précède* cette dernière sans lui paraître directement lié". Donc, le flux thermique ayant accompagné la phase hercynienne responsable du plissement des chaînes de l'Ougarta et donc, probablement, de l'individualisation du bassin de Sbaa, a eu lieu avant celle-ci, c'est à dire au Paléozoïque; il n'a donc pu affecter ce bassin, puisque ce dernier était situé en position structurale haute.

En nous appuyant sur les affirmations de cet auteur, nous pouvons donc avancer que le bassin de Sbaa n'a été touché par des manifestations thermiques importantes, ni durant le Paléozoïque, ni durant la phase de compression hercynienne.

Par contre, en ce qui concerne les bassins avoisinants, la présence de gisements d'hydrocarbures gazeux en leur sein pourrait être expliquée par les phénomènes de subsidence dont il a été question ci-dessus, le même auteur ayant mis en évidence la relation souvent étroite existant entre ces zones subsidentes en distension et des anomalies géothermiques (Robert, 1976).

DEUXIEME PARTIE

*CHOIX , SITUATION
ET DESCRIPTION
DES SONDAGES.
CHOIX ET PETROGRAPHIE
DES ECHANTILLONS.*

1- CHOIX, SITUATION ET DESCRIPTION DES SONDAGES

1-1- Choix et situation des sondages

Les sondages que nous avons retenus pour cette étude ont été choisis dans le but de disposer de sédiments représentatifs des différents faciès lithostratigraphiques paléozoïques déposés dans l'ensemble du bassin et des différentes profondeurs d'enfouissement. Pour cela il a été tenu compte des caractéristiques suivantes du bassin (données par les logs de forage; voir paragraphe 1-2 ci-dessous):

- certaines formations présentent des variations latérales de faciès. Le Strunien, par exemple, passe d'un faciès gréseux de réservoir d'huile au sud du bassin à un faciès de plus en plus fin et argileux vers le nord;
- les épaisseurs des différentes formations ne sont pas constantes sur toute l'étendue du bassin. Par exemple, le Gédinnien et le Namurien présentent une épaisseur maximale respectivement au nord et au sud de la voûte d'Azzène alors qu'elles sont parfois totalement absentes dans la cuvette;
- du fait du compartimentage structural du bassin, les différentes formations sont atteintes à des profondeurs différentes suivant que l'on se trouve au centre de la cuvette ou en bordure de celle-ci. Par exemple, le toit du Silurien est à la profondeur de 1700m au centre et de 1300m sur la bordure;

Les sondages les plus anciens (effectués en 1954-56) ont été délaissés car la terminologie utilisée pour désigner leurs différentes unités lithostratigraphiques n'est pas internationale mais locale.

Compte-tenu de ces observations, notre choix s'est porté sur 9 sondages, répartis comme suit (figure 5):

+ au nord-ouest de la cuvette de Sbaa:

- Sbaa Nord-1 (Sbaa N-1)
- Sbaa-1
- Sbaa-2A
- Sbaa-3

- + au centre-est de la cuvette:
 - Qued Zine-1 (QDZ-1)
- + au sud de la cuvette:
 - Hassi Ilatou-1 (LT-1)
 - Hassi Ilatou-2 (LT-2)
- + au nord de la voûte d'Azzène:
 - Azzène Nord-ouest-1 (AZNW-1)
- + au sud de la voûte d'Azzène:
 - Qued Tella-1 (OTLA-1)

1-2- Description des sondages

La pétrographie des différentes unités stratigraphiques traversées par les 9 sondages a été effectuée à partir des logs habillés de forage qui nous ont été fournis par la SONATRACH et des observations macroscopiques faites au moment de l'échantillonnage.

Les descriptions sont données dans l'annexe I.

II- CHOIX ET PETROGRAPHIE DES ECHANTILLONS

II-1- Choix des échantillons

La méthode de prélèvement des échantillons a été la suivante:

- seuls les niveaux possédant des faciès susceptibles de renfermer de la matière organique (et donc généralement de couleur foncée) ont été échantillonnés;
- les niveaux ayant, de prime abord, de mauvaises qualités de roche mère (grès et sables purs par exemple) ont été négligés sauf s'ils présentaient des indices ou des accumulations d'hydrocarbures;

- dans les formations plus ou moins homogènes, un espacement de 2 mètres environ entre deux échantillons a été respecté dans l'intervalle carotté; il peut cependant exister une lacune d'échantillonnage sur plus de 700 m en l'absence de carottage à ce niveau (par exemple à Sbaa-1; voir annexe I).

Au total, environ 160 échantillons ont été prélevés. Leur emplacement dans les sondages, leur désignation et leur description lithologique sont donnés, soit dans le paragraphe suivant pour les échantillons sur lesquels l'étude géochimique complète a été effectuée, soit dans l'annexe I pour les autres.

11-2- Pétrographie des échantillons

Une étude géochimique poussée ne pouvait être effectuée sur la totalité des échantillons en raison de leur nombre (voir paragraphe B-11-2-2 de la Troisième partie). Dans ce paragraphe ne sera donc décrite en détail que la lithologie des échantillons sur lesquels cette étude a été faite (une quarantaine environ). Les autres échantillons, qui n'ont été analysés que par pyrolyse Rock-Eval et pour déterminer leur teneur en carbone organique, sont replacés dans les unités lithologiques auxquelles ils appartiennent sur les logs de forage de l'annexe I.

L'observation des lames minces a été faite au Département de Géologie de l'Université d'Orléans, grâce à un microscope Leitz Orthoplan, avec l'aide de MM. D. CLUZEL et G. PIERRE. Cette étude avait pour but, d'une part de déterminer la microstructure de la roche et des minéraux la constituant, et, d'autre part, d'observer le mode de répartition des composés organiques en son sein.

Nous avons effectué toutes les descriptions d'échantillons en suivant la nomenclature et les recommandations de Scolari et Lille (1973). Etant donné que nous n'avons pas déterminé la granulométrie précise des roches détritiques terrigènes dont la majorité des éléments est inférieure à 63 µm, nous n'avons pas fait la distinction entre siltites et argilites, que nous avons regroupées sous la dénomination de lutites.

- Sondage Sbaa-1

TOURNAISIEN + 1 bis (419,20m): lutite quartzreuse finement laminée à matrice argileuse et grains peu émoussés. Quelques

plagioclases et lamelles de micas blancs sont dispersés dans la matrice.

+ **4 bis (465,00m)**: lutite argileuse, micacée (mica blanc), légèrement quartzreuse, assez riche en matière organique (sous forme de particules figurées opaques).

+ **6 (502,80m)**: grès silteux fin à 2 phases, assez riche en chlorite magnésienne. Les grains de quartz, faiblement émoussés, ne présentent aucun granoclassement. Des opaques remplissent les interstices (hydrocarbures lourds?). Quelques fantômes de coquilles dolomitisés et calcitisés.

STRUNIEN + **8 bis (544,60m)**: lutite argileuse légèrement quartzreuse à litage apparent et grains bien classés. Assez riche en matière organique figurée. Quelques micas blancs.

+ **12 (629,80m)**: alternance de lutite quartzreuse à grains bien classés et de lutite argileuse riche en matière organique et en phyllites (séricite ou illite). Présence de pyrite (confirmée par diffractométrie des rayons X).

GIVETIEN + **18 (1312,80m)**: micrite micacée composée de lamines alternativement riches et pauvres en matière organique. Pyrite plus abondante que dans l'échantillon précédent.

SILURIEN + **22 (1331,40m)**: lutite quartzreuse devenant plus argileuse à la base. La limite est soulignée par un lit de framboïdes de pyrite. Matière organique moins abondante que dans l'échantillon précédent et représentée presque uniquement par des Tasmanacées.

+ **24 (1337,50m)**: échantillon semblable au précédent, mais plus argileux et à litage bien visible souligné par des phyllites.

+ **28 (1414,90m)**: échantillon semblable au précédent mais plus riche en pyrite (et, dans une moindre mesure, en quartz) et contenant des particules ovoïdes opaques (Tasmanacées?).

• Sondage Sbaa H-1

TOURNAISIEN + 139 (614,00m): lutite quantzeuse à ciment argileux passant par endroits à une "microquantzite" à grains jointifs dans lesquels on observe une recristallisation progressant de la périphérie vers le centre.

+ 144 (734,70m): grès fin homogène alternant avec des niveaux plus fins et argileux. Ces derniers sont "imprégnés" d'une matière organique "bitumineuse" que l'on retrouve au niveau des discontinuités et des microfissures de la partie gréseuse.

• Sondage Sbaa-3

TOURNAISIEN + 57 (395,80m): lutite quantzeuse à matrice argileuse.
Litage bien visible souligné par quelques phyllites et des débris de végétaux.

+ 62 (443,00m): alternance de lits de lutite micacée et argileuse, riches en matière organique (dont quelques Tasmanacées) et de lits gréseux à grains arrondis de tailles variées, sans classement apparent.
On observe plusieurs figures sédimentaires particulières: injection de matériel quantzeux dans la fraction argileuse supérieure, figures de charge, etc.

STRUNIEN + 68 (1287,40m): lutite argilo-micacée renfermant dans certains niveaux de la calcite crypto-cristalline. Alternance de fines lamines contenant soit des baguettes de séricite, soit de la matière organique.

GIVETIEN + 73 (1340,00m): biocalcarénite à ciment micritique, légèrement quantzeuse. Le ciment remplit également des tests de mollusques. Un peu de pyrite.

SILURIEN + 76 (2049,00m): lutite quantzo-argileuse assez riche en matière organique amorphe. Litage apparent. Présence d'une lentille quantzeuse soulignée à sa périphérie par de la matière organique opaque.

• Sondage 002-1

- NAMURIEN + 78 (623, 20m): lutite quartzo-argileuse sans litage apparent ni granoclassement. Quelques phyllites. Présence de matière organique amorphe.
- TOURNAISIEN + 85 (813, 10m): lutite argilo-quartzreuse légèrement micacée sans granoclassement. Matière organique amorphe.
- STRUNIEN + 87 (813, 10m): lutite argileuse à litage bien visible souligné par des phyllites. Présence de deux types de matière organique: des plages amorphes assez sombres et intimement liées à la matrice argileuse d'une part; des éléments figurés anguleux et noirâtres (débris de végétaux supérieurs?) et des Tasmanacées d'autre part.
- SILURIEN + 89 (2107, 30m): échantillon formé essentiellement de grains de quartz assez anguleux, parfois polycristallins, sans granoclassement, dans un ciment organique isotrope, ferrugineux. Certains grains semblent "corrodés" par le ciment organique; d'autres contiennent des inclusions solides (rutile ou biotite). Présence de pyrite en quantités importantes (confirmée par diffractométrie des rayons X).

• Sondage A2NW-1

- STRUNIEN + 32 (803, 10m): lutite argileuse, légèrement quartzreuse, très riche en phyllites.
- + 41 (867, 75m): lutite argileuse très micacée contenant de la matière organique ligneuse et des Tasmanacées.
- + 42 (874, 15m): lutite argileuse assez riche en matière organique amorphe. Intercalations de très fines lamines siliceuses ondulées ("microslumps").
- FAMENNIEN + 49 (905, 40m): échantillon semblable au n° 41.
- + 53 (1117, 50m): lutite argileuse légèrement quartzreuse. Présence de framboïdes de pyrite et de particules figurées allongées et noirâtres de matière organique ligneuse.

- + **54 (1121,70m)**: alternance de lutite argileuse légèrement quartzreuse et de grès fin à matrice argileuse. Pyrite mise en évidence par diffractométrie des rayons X.

- **Sondage OTLA-1**

SILURIEN + **91 (1590,30m)**: lutite argileuse légèrement quartzreuse, riche en phyllites et en Tasmanacées orientées parallèlement au litage apparent.

- **Sondage LT-1**

FAMENNIEN + **116 (1062,10m)**: lutite quartzreuse à matrice argileuse passant latéralement à du grès quartzeux. Présence de matière organique figurée (Tasmanacées?).

- **Sondage LTHW-1**

STRUNIEN + **103 (1453,45m)**: lutite quartzo-argileuse intercalée de fines lamines phylliteuses.

- + **109 (1529,55m)**: lutite quartzreuse légèrement argileuse composée de lits alternativement riches et pauvres en matière organique amorphe.

TROISIEME PARTIE

*PROTOCOLE EXPERIMENTAL
ET RESULTATS DE
L'ETUDE GEOCHIMIQUE
ET PETROLOGIQUE
DU CONTENU ORGANIQUE
DES ECHANTILLONS.*

A- PROTOCOLE D'ETUDE

Dans ce chapitre, nous présenterons le protocole expérimental employé pour l'étude des échantillons de la cuvette de Sbaa. Les différentes étapes de ce protocole seront présentées en distinguant la pétrologie organique des sédiments (Chapitre I), la géochimie organique des sédiments (Chapitre II) et l'étude, à la fois pétrologique et géochimique, des Tasmanacées isolées des niveaux du Silurien (Chapitre III); à l'intérieur de chacun de ces chapitres, les différentes étapes seront décrites dans l'ordre logique dans lequel elles ont été effectuées et qui est résumé dans la figure 12.

I- ETUDE PETROLOGIQUE

I-1- Etude de lames minces au microscope polarisant

Voir paragraphe II-2 de la Deuxième partie.

I-2- Etude de sections polies et de concentrés densimétriques

Une quarantaine d'échantillons ont été montés en sections polies ; en raison de la friabilité des sédiments, nous avons été amenée à les inclure dans de la résine.

Une concentration densimétrique a été effectuée sur la totalité de nos échantillons. Cette manipulation a pour but d'isoler de la roche un concentré richement organique, et donc plus facilement analysable par les méthodes de la pétrologie organique. Notons que ce concentré ne représente qu'une fraction de la matière organique totale de la roche.

* méthode de préparation des concentrés densimétriques

L'échantillon, broyé à 200 μ m, est soumis à une centrifugation (3000 tours/mn pendant 10mn) dans un mélange bromoforme-alcool de densité 1,7 , ce qui permet de séparer matière minérale et matière organique. Cette dernière est récupérée par filtration (1,2 μ m) du surnageant. Le filtre portant la matière organique

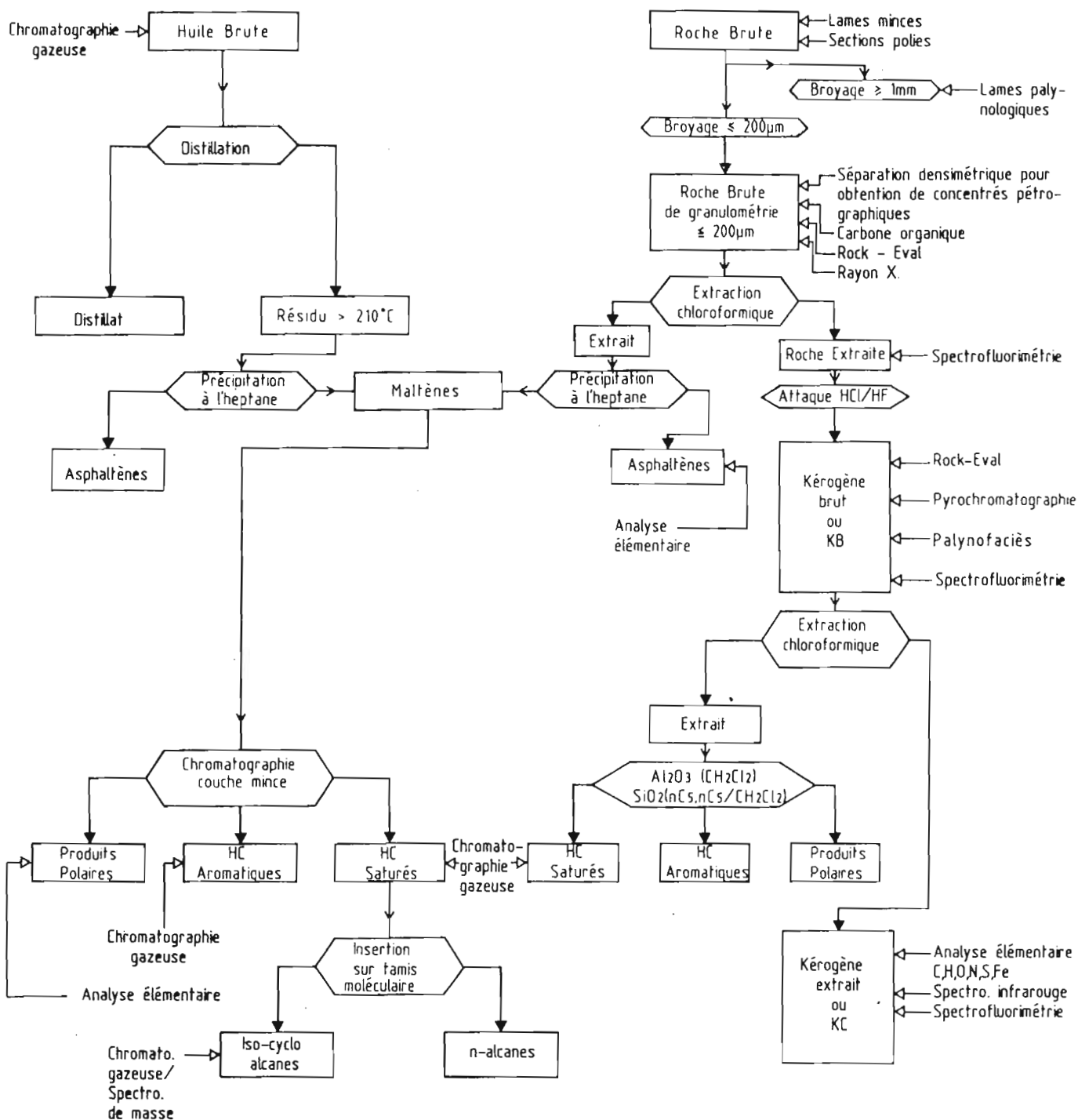


Figure 12 : PROTOCOLE EXPERIMENTAL DE L'ETUDE ANALYTIQUE DES SEDIMENTS DE LA CUVETTE DE SBAA -

est alors placé sur une lame en plexiglas. On verse ensuite sur le tout quelques gouttes d'acétate d'éthyle, de manière à dissoudre le filtre et à fixer la matière organique sur la lame. L'échantillon est finalement poli.

1-2-1- Etude réflectométrique

Le principe et les applications des mesures du pouvoir réflecteur de la vitrinite des sédiments sont désormais bien connus en pétrologie organique (Hoffmann und Jenkner, 1932; Teichmüller, 1958; Alpern, 1967; Bartenstein et Teichmüller, 1974; Alpern et Cheymol, 1978; Robert, 1979), aussi il ne nous a pas paru indispensable de les rappeler ici.

L'appareillage utilisé dans notre cas est un microscope "Leitz Orthoplan MPV-Compact" couplé à un micro-ordinateur "HP-85" pour la saisie et le traitement des données.

1-2-2- Etude microspectrofluorimétrique

• Principe de la méthode (d'après Bertrand, 1985)

Il "consiste à faire parvenir à la surface du composé organique choisi un faisceau dit "d'excitation" dont les caractéristiques spectrales sont imposées, d'une part par la source du rayonnement, d'autre part par le ou les systèmes filtrants que l'on introduit entre la source et l'objet. En réaction à cette excitation qui, dans nos conditions d'analyse affecte surtout les niveaux énergétiques des électrons π , la matière organique va subir une désexcitation dont l'un des mécanismes possibles est la fluorescence. L'émission de cette fluorescence se produit dans une gamme de longueurs d'onde supérieure à celle de l'excitation."

On caractérise le spectre d'émission de fluorescence obtenu par les paramètres suivants (introduits par Van Gijzel, 1967; modifiés par Ottenjann und al., 1975, et Ottenjann, 1980): la moyenne des longueurs d'onde dont l'intensité est supérieure ou égale à 95% de l'intensité maximale du spectre (L_{max}); la surface du spectre d'émission compris entre 430 et 750 nm, normalisée par rapport à un étalon de verre "Uranyl" (E); le rapport de l'intensité à 650 nm sur l'intensité à 500 nm ($I_{650/500}$); le rapport de la surface du spectre comprise entre 535 et 750 nm sur la surface comprise entre 430 et 535 nm (Q_{F-535}). La coupure à 535 nm correspond au maximum d'émission

de l'étalon de verre "Uranyl", où le facteur de correction est égal à 1.

• Appareillage utilisé (d'après Martinez et al., 1987)

Le système optique est composé d'un microscope "Leitz Orthoplan MPV-III" équipé d'une lampe d'excitation à vapeur de mercure (100 W), d'un illuminateur "Ploemopak" contenant un filtre d'excitation à 365 nm et un filtre d'observation à 390 nm et d'un monochromateur. Il est couplé à un photomultiplicateur "EMI-96588" relié à un micro-ordinateur "HP-86" pour la saisie et le traitement des données.

L'étude microspectrofluorimétrique se fait sur les mêmes préparations (sections polies et concentrés densimétriques) que la réflectométrie. Dans notre cas, l'étude a été faite en immersion d'eau.

1-3- Etude palynologique

Le résidu palynologique est obtenu en suivant un protocole relativement semblable à celui qui aboutit à l'obtention des kéroènes (ce dernier protocole est décrit dans le paragraphe A-11-4-1 de cette Troisième partie), à la différence que l'on conclut la série d'attaques acides de la roche par une filtration suivie d'un tamisage à 200 µm permettant de récupérer les spores et les pollens dans le refus.

Le cortège organique dans son ensemble a été étudié grâce à un montage entre lame et lamelle du kéroène isolé suivant le protocole décrit dans le paragraphe A-11-4-1, avec l'aide de Mme G. FARJANEL du Bureau de Recherches Géologiques et Minières (B.R.G.M.) d'Orléans. Nous avons déterminé le palynofaciès de ce kéroène, c'est à dire que nous avons établi qualitativement le rapport entre les débris ligneux et la matière organique sapropélique (voir paragraphe B-11-1-1-2).

Le résidu palynologique a été étudié dans le même but, ainsi que pour des besoins stratigraphiques; la confirmation de certaines limites stratigraphiques a été effectuée, grâce à l'obligeance de M. R. COQUEL, au Laboratoire de Paléobotanique et de Biostratigraphie du Paléozoïque de l'Université de Lille (avec l'aide de M. R. RAUSCHER du Centre de Sédimentologie et de Géochimie de la Surface de l'Université Louis Pasteur de Strasbourg).

II- ETUDE GEOCHIMIQUE

II-1- Etude des roches brutes

II-1-1- Dosage du carbone organique

Le carbone total et le carbone organique ont été dosés sur la totalité des échantillons grâce à un analyseur de carbone type Carmograph dont le principe est donné dans l'annexe II.

II-1-2- Pyrolyse Rock-Eval

La totalité des échantillons bruts a été soumise à la pyrolyse Rock-Eval. La procédure, établie par Espitalié et al. (1977, 1985, 1986), est décrite en détail dans l'annexe II. Elle consiste à chauffer un échantillon en programmation de température, sous atmosphère d'hélium, pour obtenir la libération des hydrocarbures libres présents dans la roche (pic S1), des hydrocarbures formés par craquage du kérogène (pic S2) et du CO₂ (pic S3), afin de déterminer sélectivement et quantitativement les paramètres suivants:

- l'index d'hydrogène (IH) correspondant à la quantité d'hydrocarbures libérés par la pyrolyse (pic S2), rapportée au carbone organique total (COT). Il caractérise le potentiel chimique en hydrocarbures de la matière organique suivant son type et son degré d'évolution;

- l'index d'oxygène (IO) s'exprime en milligrammes de CO₂ libéré par la pyrolyse par gramme de COT. Dans la mesure où il existe une assez bonne corrélation entre cet index et le rapport atomique O/C, on peut considérer, en première approximation, qu'il représente la richesse en oxygène de la matière organique;

- l'index de production (IP) est le rapport S1/S1+S2. Il exprime la proportion d'hydrocarbures libres par rapport à la totalité des hydrocarbures obtenus par pyrolyse;

- la température atteinte au sommet du pic S2, exprimée en degrés Celsius, est appelée Tmax. Le pic S2 est lié à la répartition des énergies d'activation nécessaires au craquage de la matière organique, et à la loi de chauffe (25°C par minute). Pour une même loi de chauffe (25°C/mn), l'évolution thermique naturelle de la matière organique se traduit par une augmentation du Tmax (Tissot et Espitalié, 1975; Espitalié et al., 1977).

11-2- Extraction chloroformique

L'extraction au chloroforme (CHCl_3) permet de séparer de la roche étudiée la matière organique soluble dans les solvants organiques (appelée extrait ou bitumes).

Dans le cadre de notre étude, cette extraction a été effectuée sur une trentaine d'échantillons. Nous avons fait en sorte que la teneur en carbone organique et le potentiel en hydrocarbures de la matière organique de ces échantillons soient représentatifs de l'ensemble des étages stratigraphiques recoupés par les sondages.

*Méthode d'extraction : un poids connu d'échantillon placé dans un bécher et additionné de chloroforme (10 cm^3 de solvant pour 1g de roche) est mis sur plaque chauffante (40 à 50°C), sous agitation magnétique, pendant 1 heure. On filtre de façon à séparer le solide résiduel (roche brute extraite) et le liquide (extrait + chloroforme). On évapore la plus grande partie du chloroforme à l'évaporateur rotatif et on récupère l'extrait ainsi concentré dans une nacelle en aluminium tarée. Le reste du CHCl_3 s'évapore généralement en l'espace d'une nuit, à température ambiante. On pèse ensuite l'ensemble (nacelle + extrait sec) et on en déduit le poids et les pourcentages pondéraux de l'extrait par rapport au poids de départ et au carbone organique total de l'échantillon (Monin et al., 1978).

Dans le cas où l'extrait organique obtenu est riche en soufre libre (solubilisé par CHCl_3), ce dernier est gênant pour la séparation des saturés et des aromatiques. L'extrait en est donc débarrassé par percolation sur une colonne remplie d'un amalgame de cuivre et de zinc (Monin et al., 1978).

11-3- Etude des bitumes

11-3-1- Séparation des principales fractions de l'extrait

Nous avons utilisé la méthode de chromatographie sur couche mince décrite par Huc et al. (1976). Cette méthode permet de séparer 3 fractions correspondant à 3 bandes de migration, à savoir, de la plus proche à la plus éloignée de la ligne de dépôt sur la plaque: les composés polaires, les hydrocarbures aromatiques et les hydrocarbures aliphatiques saturés et insaturés.

Dans le cas de notre étude, nous avons effectué cette séparation sur les extraits dont le poids était supérieur à 10 mg, c'est à dire une vingtaine d'échantillons. Nous avons utilisé des plaques de silice de 0,25 mm d'épaisseur pour des dépôts supérieurs à 20 mg.

*Méthode de séparation : l'extrait (ou l'huile), de poids connu, désasphalté par précipitation des asphaltènes dans le n-heptane, est solubilisé dans le chloroforme puis déposé sur une plaque recouverte de gel de silice (selon une ligne parallèle à l'un des côtés et distante de 2 à 3 cm de celui-ci). Cette plaque est alors placée verticalement dans une cuve en verre contenant du cyclohexane (dont le niveau arrive à quelques mm sous le dépôt). La migration de celui-ci vers le haut de la plaque entraîne les différentes fractions. Lorsque le solvant est parvenu à 1 ou 2 cm du bord supérieur de la plaque, celle-ci est retirée de la cuve et séchée à l'air libre pendant 1 heure.

Les bandes correspondant aux 3 différentes fractions sont localisées par observation de la plaque sous éclairage U.V. : les composés poirains, dont la migration est faible ou nulle, apparaissent très sombres; les aromatiques présentent une vive fluorescence allant du bleu clair au violet foncé; les saturés sont révélés par vaporisation de berbérine, qui les fait apparaître blanchâtres.

Les 3 parties du gel sont alors grattées séparément, broyées et recouvertes de chloroforme durant une nuit de manière à redissoudre les composés organiques. Après filtration, les différentes fractions sont séparées du solvant par évaporation de celui-ci, placées dans des nacelles en aluminium tarées, puis pesées.

11-3-2- Analyse par chromatographie en phase gazeuse

La chromatographie en phase gazeuse (CPG) est une technique qui permet la séparation des différents composants d'une huile ou d'un extrait suivant leur température de volatilisation et leur vitesse de migration dans une colonne capillaire (fonction de leur poids moléculaire). Selon la fraction sur laquelle cette technique est appliquée, elle donne soit une image globale de la composition moléculaire dans le cas d'une huile, soit une information quantifiée dans le cas d'une fraction isolée de cette huile, les n-alcanes par exemple. En effet, l'application de cette technique, très utilisée en géochimie pétrolière, permet avec une bonne précision l'analyse quantitative des n-alcanes dans les hydrocarbures saturés isolés d'une huile brute ou d'un extrait de roche.

Les conditions d'analyse sont décrites dans l'annexe II.

11-4- Etude des kérogènes

11-4-1- Isolement du kérogène brut (KB)

Le kérogène est par définition la fraction de la matière organique sédimentaire insoluble dans les solvants organiques. Théoriquement, on l'isole en solubilisant la phase minérale tout en gardant intacte la composition chimique de la matière organique (Durand, 1980).

Dans notre cas, nous avons procédé à l'isolement du kérogène de la quasi-totalité des roches extraites au chloroforme. Nous avons effectué ces manipulations à l'Institut Français du Pétrole (I.F.P.), avec l'aide de M. LESAGE, selon la méthode standard mise au point par Durand et Honin (1980).

* Méthode d'isolement du KB : cette méthode consiste en une suite d'attaques acides menées à une température de 70 C environ, en agitation continue (de manière à maintenir les particules en suspension) et sous courant d'azote (pour éviter toute oxydation de la matière organique).

On procède tout d'abord à l'élimination des carbonates, sulfates et oxydes : on attaque dans un b cher, à froid, par HCl 6N, environ 10 g de roche extraite, jusqu'à disparition de l'effervescence, puis on transvase le tout dans le réacteur (k rog natron représenté dans la figure 13); on laisse l'attaque se poursuivre durant une nuit. On procède ensuite à la dissolution des silicates grâce à un mélange d'acide fluorhydrique (HF) 40% et de HCl 6N dans les proportions respectives 2/3 et 1/3. Enfin, une dernière attaque par HCl 6N est effectuée pour éliminer les complexes fluorures qui auraient pu se former lors de l'étape précédente (Forsman and Hunt, 1958). Chaque attaque acide est suivie d'un lavage soigné à l'eau déminéralisée. Le kérogène est finalement récupéré et mis à sécher à 70 C sous courant d'azote.

Dans notre cas , le kérogène récupéré est le KB (kérogène brut, selon la nomenclature de l'I.F.P.) puisque le produit de départ était une roche extraite au chloroforme.

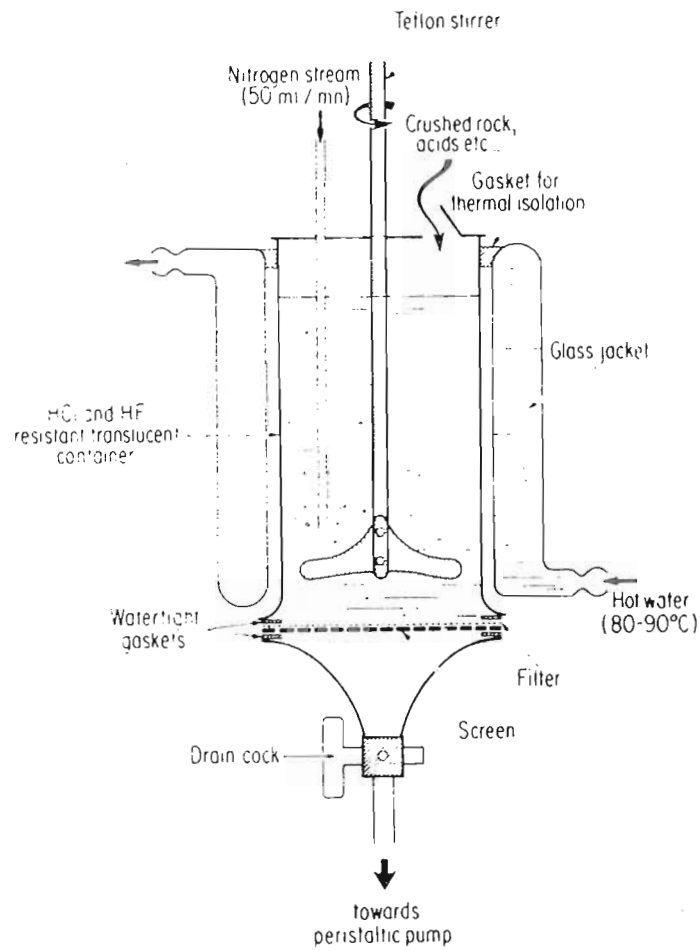


Figure 13 : Dispositif IFP pour l'isolement du kérogène (d'après Durand and Nicaise, 1980).

11-4-2- Extraction du kérogène brut (KB) et fractionnement de son extrait

Nous avons procédé à l'extraction chloroformique d'une partie aliquote (entre 100 et 500 mg) du kérogène brut (KB) suivant la méthode décrite dans le paragraphe 11-2 ci-dessus. En sus, l'élimination d'une partie des minéraux résiduels (la pyrite principalement) a été faite par décantation dans le chloroforme sur proposition de Mme Bernon de l'I.F.P. La fraction insoluble du KB est le kérogène extrait ou KC. Ce dernier, produit de référence, a servi aux analyses ultérieures en vue de sa caractérisation.

Dans une optique méthodologique, nous avons comparé les quantités d'extrait obtenues à partir de la roche brute et celles obtenues après traitement acide de la même roche, cela en fonction de l'évolution diagénétique.

Pour déterminer la composition (HC saturés, HC aromatiques et produits polaires) de l'extrait de KB et étant donné la faible quantité de ce dernier (de 1,27 à 8,29 mg) nous avons employé la méthode de fractionnement rapide par chromatographie liquide décrite par Béhar et Leblond (1984).

*Méthode de fractionnement : le fractionnement est réalisé à l'aide de 2 colonnes. Sur la première, remplie d'alumine, sont retenus la majorité des produits lourds (NSO).

L'éluat est recueilli et déposé sur une deuxième colonne remplie de silice sur laquelle est effectuée la séparation des saturés (HCS) et des aromatiques (HCA). Les charges peuvent être comprises entre 0,5 et 30 mg. Deux solvants légers sont retenus pour ce fractionnement, le dichlorométhane (CH_2Cl_2) et le pentane (nC5). La charge préalablement pesée dans une nacelle en aluminium (C0) et diluée avec un volume minimum de CH_2Cl_2 est déposée en tête de la colonne d'alumine. Après avoir "mouillé" le support avec le solvant jusqu'à l'apparition de la 1ère goutte, on élue avec 2500 μl de CH_2Cl_2 .

L'éluat est recueilli dans une nacelle, amené à sec et pesé (C1). Cet éluat représente les hydrocarbures totaux (HCS + HCA). Il est alors dilué dans un volume minimum de nC5 et déposé sur la 2ème colonne (silice). On "mouille" le support, puis on introduit 2500 μl de nC5 pour éluer les HCS recueillis dans la nacelle (C2). 2500 μl d'un mélange nC5- CH_2Cl_2 (65/35 en volume) sont nécessaires pour éluer les HCA recueillis dans une nacelle (C3). Le poids des composés NSO est déduit par différence (C0-(C2+C3)).

La comparaison entre C1 et C2+C3 permet d'estimer la fraction des composés NSO non retenus sur l'alumine, c'est à dire de faible polarité.

11-4-3- Caractérisation du kérogène

Nous avons utilisé, pour caractériser la nature et l'état de maturation des kérogènes, les méthodes suivantes:

- 11-4-3-1- Analyse élémentaire

Comme le carbone, l'hydrogène, l'oxygène, l'azote et le soufre représentent la quasi-totalité de la masse du kérogène, nous avons dosé ces 5 éléments sur une trentaine d'échantillons de kérogènes extraits (KC).

Il faut toutefois noter que la plupart de ces échantillons sont riches en sulfures, notamment en pyrite qui n'a pas été détruite lors du traitement acide de la roche. La mesure des teneurs en fer a donc servi à déterminer les teneurs en soufre organique de la manière suivante: on a supposé que le soufre minéral se trouvait entièrement sous forme de pyrite (FeS_2); le soufre organique a été déterminé par différence entre le soufre total donné par l'analyse et le soufre minéral calculé (Durand and Monin, 1980).

Le dosage de tous les éléments a été effectué par le Service Central d'Analyse du C.N.R.S. de Solaise. La description du protocole utilisé pour le dosage de chaque élément est donnée dans l'annexe II.

- 11-4-3-2- Pyrolyse Rock-Eval

Le principe et la procédure de cette technique, déjà appliquée aux roches brutes (voir paragraphe 11-1-2 ci-dessus) sont donnés dans l'annexe II. Toutefois, signalons que la pyrolyse effectuée sur une trentaine de kérogènes bruts (KB) a été réalisée par un Rock-Eval II au Laboratoire de Géochimie de l'I.F.P., par M. PICHARD.

Le principe de cet appareil est identique à celui du Rock-Eval de 1ère génération, excepté qu'après la pyrolyse proprement dite, la matière organique résiduelle est oxydée pour doser le carbone organique résiduel grâce à un catharomètre (pic S4). Ainsi l'on peut déduire un paramètre supplémentaire: la teneur pondérale en carbone organique total (COT) qui est la somme du carbone organique résiduel et du carbone organique pyrolysé déduit des composés hydrocarbonés des pics S1 et S2, sachant que ces composés contiennent 83% de carbone organique (Espitalié et al. 1985).

• 11-4-3-3- Spectroscopie d'absorption infrarouge

Les spectres d'absorption de la lumière infrarouge par la matière organique présentent une série de bandes qui révèlent la présence de certains groupes moléculaires et de liaisons chimiques. L'intensité relative de chaque bande peut être quantifiée et comparée d'un échantillon à un autre. Cette méthode permet donc de caractériser globalement le kérogène par un nombre de paramètres, empiriques certes, mais possédant néanmoins une signification chimique assez claire (Robin et al., 1977).

Dans le cadre de cette étude, 18 échantillons de kérogènes extraits (KC) ont été analysés par le spectrophotomètre DIGILAB 15 E du Département de Physique de l'I.F.P., grâce à l'obligeance de Mme SZYDLOWSKI. Les résultats ont été dépouillés par analyse mathématique (transformée de Fourier).

Les échantillons sont analysés sous forme de pastille dont la méthode de préparation est la suivante: 1 à 2 mg de KC sont dispersés dans 300 mg de bromure de potassium (KBr). Le bromure de potassium est utilisé comme support car il ne présente pas de bandes d'absorption dans le domaine des longueurs d'ondes considérées (Rao, 1963). Le mélange est broyé et homogénéisé. Les pastilles sont faites sous une pression de 10 tonnes/cm² et stockées en atmosphère sèche pendant une semaine pour les déshydrater (Robin, 1975).

Nous avons effectué les préparations de nos pastilles au Centre de Recherches sur les Solides à Organisation Cristalline Imperfaite du C.N.R.S. d'Orléans, grâce à l'obligeance de MM. VAN DAMME et OBRECHT.

• 11-4-3-4- Couplage pyrolyse-chromatographie en phase gazeuse

Le but de cette méthode est de préciser la composition moléculaire des hydrocarbures libres et de ceux libérés par la pyrolyse. Elle constitue donc un complément utile du Rock-Eval en fournissant, en première approximation, la composition des pics S1 et S2 (Behar and Pelet, 1985).

Nous avons effectué ce type d'analyse sur une série de 5 échantillons de kérogènes bruts (KB) d'états diagénétiques croissants, au Laboratoire de Géochimie Organique de l'I.F.P., avec l'aide de M. ESPITALIE. Le protocole expérimental suivi est indiqué dans l'annexe II.

III- ETUDE DES TASMANACEES DU SILURIEN

La richesse en Tasmanacées du Silurien du sondage OTLA-1 (voir paragraphe B-11-1-1 ci-dessous) nous a permis de concentrer celles-ci et d'obtenir ainsi un matériel organique naturel d'une remarquable pureté. Comme d'autre part ces Algues sont relativement immatures (voir paragraphe B-11-2-1-2), leur étude par les méthodes de la géochimie pétrolière (notamment les techniques de simulation de la formation des hydrocarbures) présente un grand intérêt.

Le protocole d'étude qui a été appliqué à ce concentré est résumé dans la figure 14.

Le concentré a été obtenu par séparation densimétrique effectué sur l'échantillon n°94 (OTLA-1, Silurien, 1596,80m); par différence avec le protocole décrit dans le paragraphe A-1-2 ci-dessus, la densité du mélange bromoforme-alcool a été dans ce cas fixée à 1,2. La "pureté" du concentré a été vérifiée grâce à un microscope WILD M 420: les Tasmanacées représentent 90 à 95% du contenu (photo A de la planche I), et ne sont accompagnées que de quelques spores et de matrice minérale qui leur est restée liée.

Ce concentré a été analysé du point de vue de sa composition élémentaire (méthode exposée dans le paragraphe A-11-4-3-1), par pyrolyse Rock-Eval (méthode exposée dans le paragraphe A-11-4-3-2), et par microspectrofluorimétrie (méthodes exposées dans le paragraphe A-1-2-2). Ces analyses ont été effectuées dans le double but de comparer le concentré aux Tasmanacées en place dans la roche et de déterminer son potentiel en hydrocarbures.

Pour compléter et affiner ces résultats, nous avons tenté de déterminer le potentiel en hydrocarbures de ce concentré par deux techniques de simulation de la formation d'hydrocarbures : programme "OPTIM" et pyrolyse en milieu confiné.

* Nous avons eu accès au programme "OPTIM" de l'I.F.P. grâce à MM. HUC et LERAT. Ce programme fournit des paramètres cinétiques qui permettent de déterminer la distribution des énergies d'activation nécessaires au craquage de la matière organique.

Le schéma cinétique utilisé (Ungerer, 1987), similaire à celui de Tissot et Espitalié (1975), décrit la formation des hydrocarbures par 21 réactions

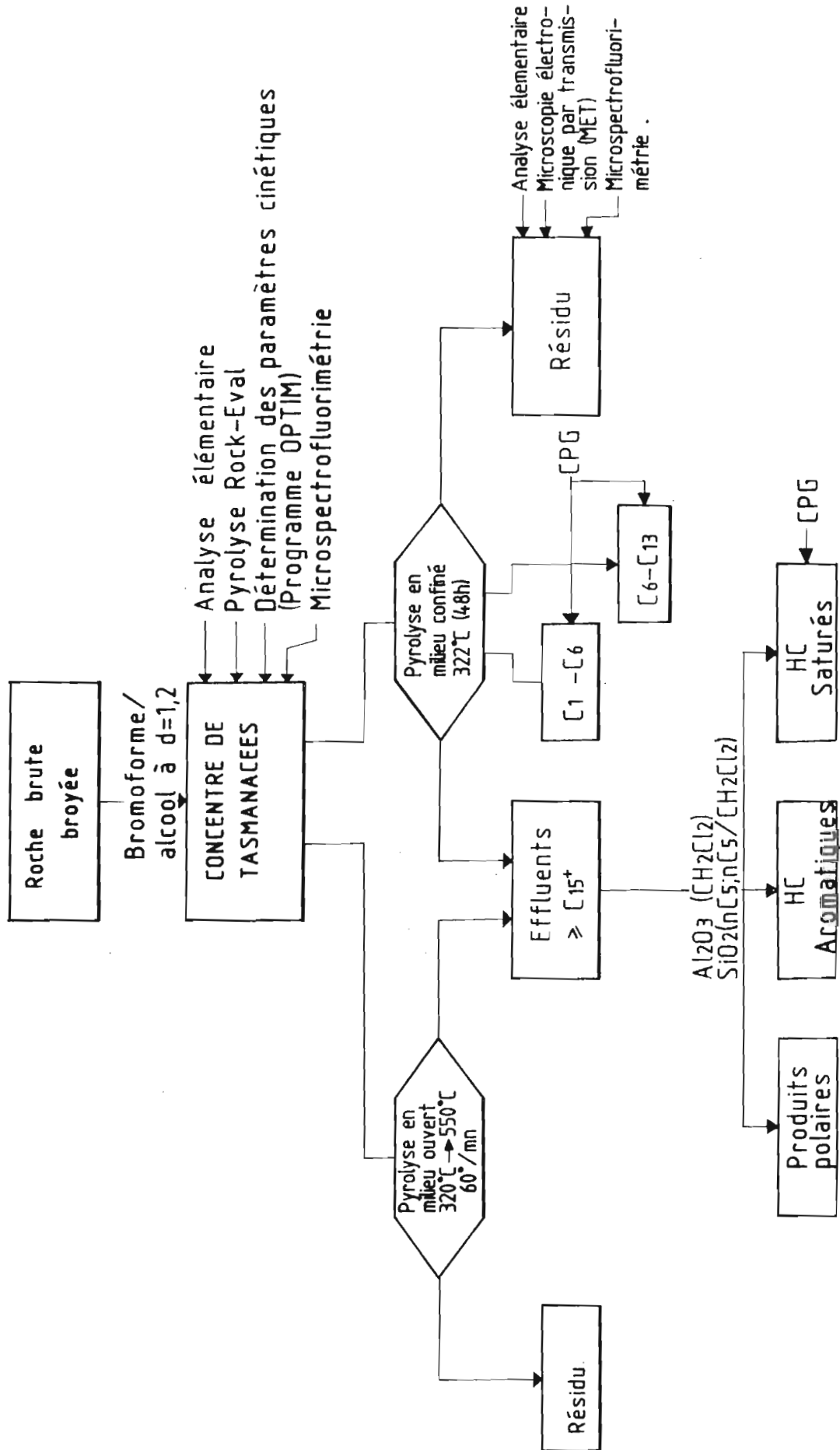


Figure 14 : Protocole d'étude des Tasmanacées du Silurien du sondage OTLA-1.

parallèles dont les énergies d'activation varient de 40 à 80 kcal/mole (on caractérise chaque réaction par un mécanisme d'ordre 1 par la loi d'Arrhénius). La détermination des paramètres cinétiques se fait par ajustement jusqu'à ce que les résultats du modèle se rapprochent au plus près des données de pyrolyse obtenues à différentes vitesses de chauffe.

* La pyrolyse en milieu confiné permet d'apprécier le rendement en hydrocarbures de la matière organique et de déterminer la composition de tous les produits formés, y compris la fraction la plus légère (C1-C4). Nous l'avons mise en oeuvre au Département de Géochimie de l'I.F.P., avec l'aide et les conseils de MM. MONIN et LERAT et de Mlle MAGNIER.

Les conditions d'analyse retenues dans notre cas (322°C, 48h, 80 MPa) l'ont été sur la base des travaux de simulation effectués dans ce Département: elles correspondent à un stade où la génération d'hydrocarbures est maximum et où les réactions secondaires entre les produits formés sont minimales. Le protocole utilisé (Monin, 1987) est résumé dans l'annexe II.

Le résidu solide issu de la pyrolyse en milieu confiné a été analysé du point de vue de sa composition élémentaire (méthode décrite dans le paragraphe A-II-4-3-1), et par microspectrofluorimétrie (méthodes décrites dans le paragraphe A-I-2-2). Il a été observé en microscopie électronique à transmission par Mme BONNAMY du Laboratoire Marcel Mathieu (C.N.R.S., Pau); la préparation de l'échantillon et les conditions d'observation sont décrites dans l'annexe II.

Enfin, le concentré de Tasmanacées a été soumis à une pyrolyse en milieu ouvert afin de préciser la composition moléculaire des effluents de pyrolyse pour la fraction C13+ condensable dans des conditions où, contrairement à la pyrolyse en milieu confiné, on est sûr que les réactions secondaires entre produits formés sont négligeables (Béhar and Pelet, 1985).

Cette analyse a été effectuée au Département Géochimie de l'I.F.P., grâce à l'obligeance de Mme BEHAR. Le mini-pyrolyseur utilisé (Ti=150°C; Tf=600°C; 60°C/mn) est similaire à l'appareil utilisé pour la caractérisation des kénogènes (paragraphe A-II-4-3-4), à la différence que le chromatographe est remplacé par un piège à effluents en C13+ (azote liquide); ceux-ci sont alors séparés sur mini-colonne (protocole décrit dans le paragraphe A-II-3-1) et les hydrocarbures saturés sont alors analysés par CPG suivant le protocole décrit dans le paragraphe A-II-3-2 (Ti=100°C; Tf=300°C; 4°C/mn).

B- RESULTATS OBTENUS

1- INTRODUCTION A L'ETUDE DE LA MATIERE ORGANIQUE

La matière organique se présente généralement à l'état dispersé dans les sédiments. Les concentrations fortes tels que les charbons ne constituent qu'une faible part de la totalité de la matière organique sédimentaire.

Dans des conditions exceptionnelles, le pourcentage de la matière organique dans les sédiments qui est en moyenne inférieur à 1 % peut atteindre des valeurs de 2 à 10 % et d'avantage.

Outre qu'elle est une source de combustibles fossiles, l'étude de cette matière organique est d'un intérêt certain car elle enregistre, au même titre que les composants minéraux, divers processus qui affectent les sédiments; elle est notamment sensible aux phénomènes thermiques.

L'évolution de la matière organique dépend, pour une part, de son origine. Tissot et al. (1974) ont été les premiers à distinguer les types principaux de kérogènes en fonction de l'origine biologique de leurs précurseurs (figure 15):

* le type I qui dérive principalement d'une biomasse algale lacustre. La série de référence est celle des Green River Shales aux Etats Unis;

* le type II qui dérive principalement d'une biomasse planctonique marine. La série de référence est celle des schistes cartons du Toarcien inférieur du bassin de Paris;

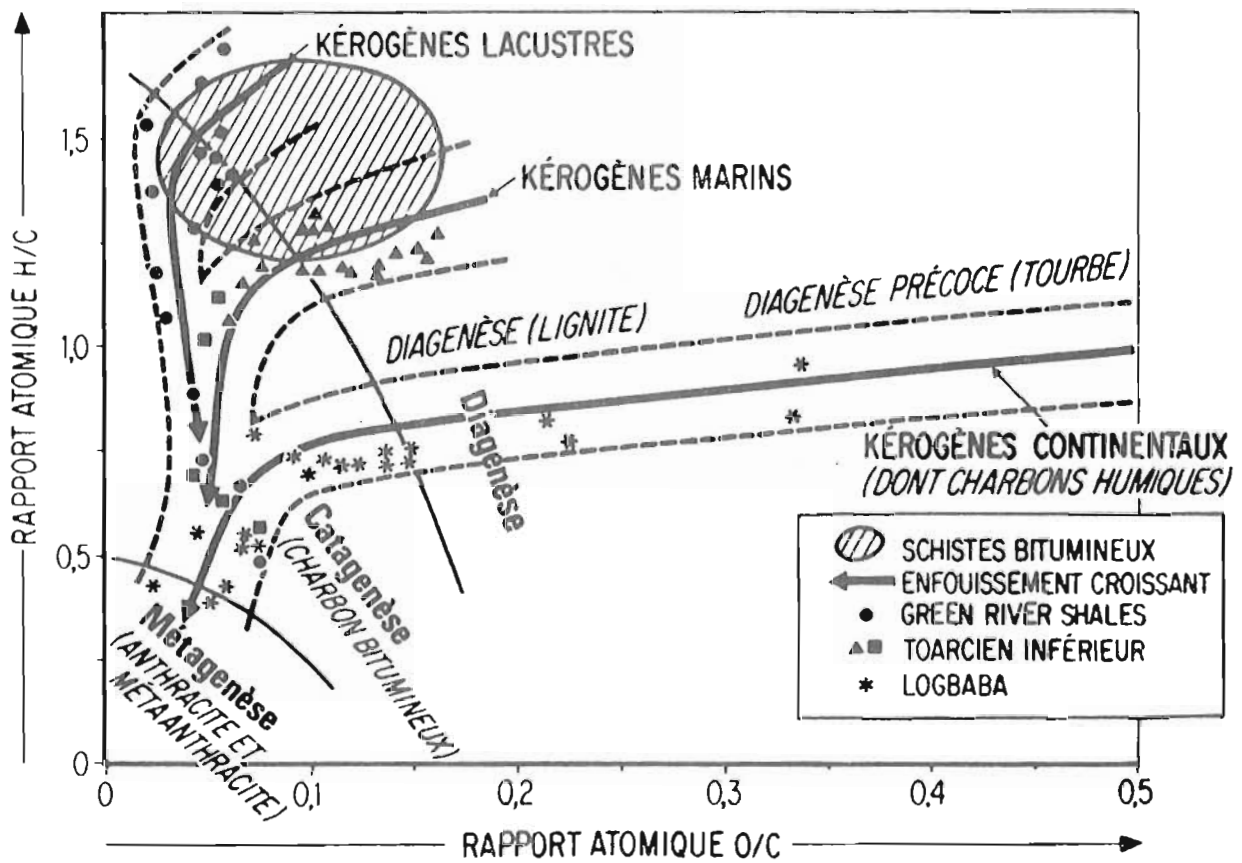


Figure 15 : Diagramme H/C, O/C des kérogènes et charbons des différentes séries de référence (d'après Durand et al. 1985)

* le type III , d'origine continental, qui dérive principalement d'une biomasse de végétaux supérieurs ayant sédimenté dans un environnement marin proche du continent (série de Logbaba au Cameroun), deltaïque (série de la Mahakam en Indonésie) ou intracontinental (bassins houillers limniques).

Il existe un kérogène issu de végétaux supérieurs mais ayant subi des phénomènes de fusinisation importants avant ou pendant son dépôt; ce kérogène est nommé type IV. Ce type IV se rencontre rarement seul, mais plutôt en association avec les autres types.

Les quantités de carbone, d'hydrogène et d'oxygène - composants majeurs des kérogènes - varient suivant le type des kérogènes. Ainsi, et pour un même degré d'évolution, les rapports atomiques H/C croissent quand on passe du type III au type II puis au type I, tandis que les rapports atomiques O/C décroissent.

Plusieurs facteurs agissent sur l'évolution de la matière organique: milieu de sédimentation, température, temps... Des mécanismes microbiologiques et/ou physico-chimiques sont mis en oeuvre pour la transformation de la matière organique au cours de son évolution.

On distingue plusieurs stades d'évolution successifs se recouvrant plus ou moins dans le temps (figure 16):

* diagenèse précoce ou "phase biochimique superficielle" où la formation de kérogène à partir de biopolymères initiaux intervient principalement;

* diagenèse sensu stricto ou "zone immature" au cours de laquelle sont libérés le gaz carbonique et l'eau principalement. Corrélativement, on assiste donc à un appauvrissement du kérogène en oxygène.

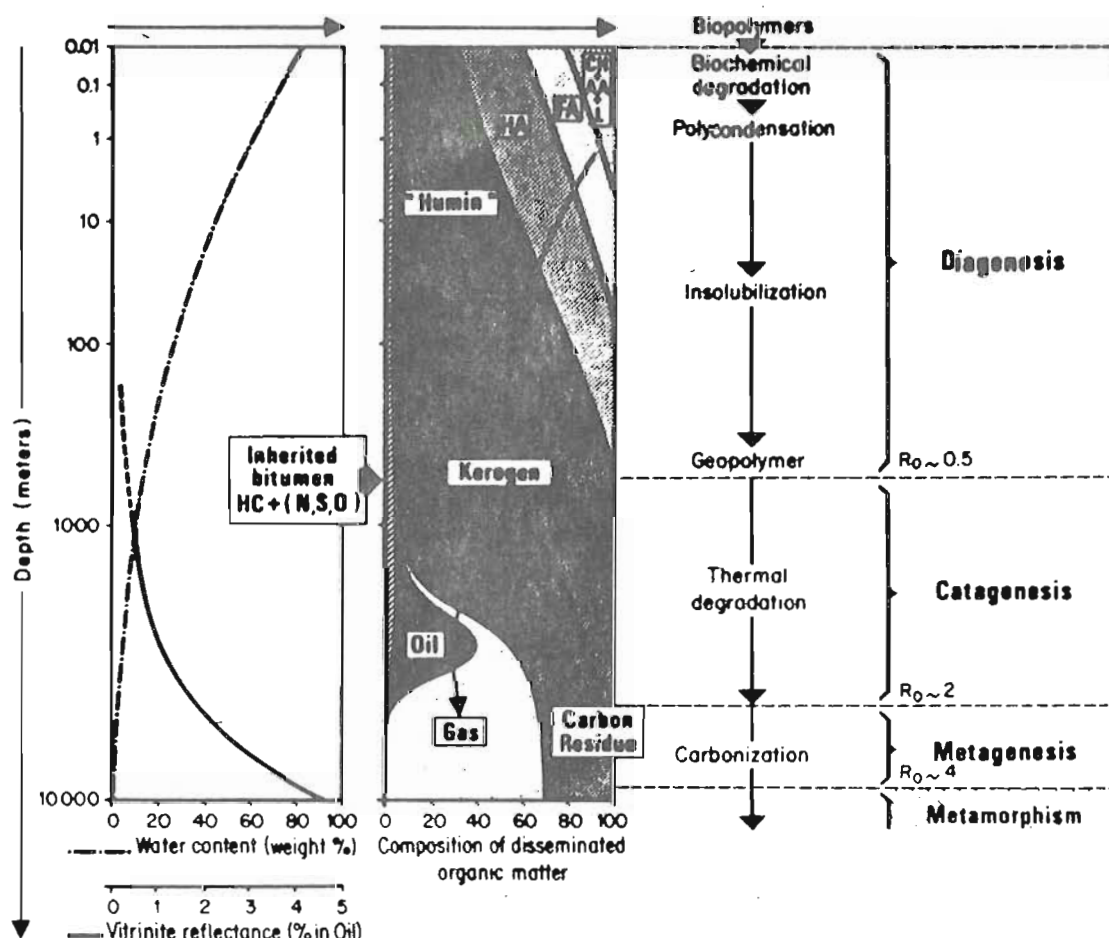


Figure 16 : Schéma général de l'évolution de la matière organique en fonction de la profondeur . CH : hydrates de carbone ; AA: acides aminés; FA: acides fulviques ; HA: acides humiques L: lipides, HC: hydrocarbures;N,S,O: produits NSO (non hydrocarbures) (d'après Tissot et Welte, 1978) .

Les deux stades suivants comprennent surtout des réactions de craquage primaire et secondaire. Le facteur déterminant y est la température correspondant à des énergies d'activation de plus en plus importantes (figure 16):

- * catagenèse, au cours de laquelle se forment successivement de l'huile puis du "gaz humide" (gaz contenant des hydrocarbures liquides dissous dans des conditions supercritiques). Le kérogène correspondant est appauvri relativement en hydrogène;

- * métagenèse, au cours de laquelle on assiste principalement à la formation de gaz sec (CH_4) à partir de l'huile formée ou du kérogène résiduel. La réorganisation, purement spatiale, du kérogène polyaromatique résiduel, se fait progressivement.

Dans ce cadre, l'étude de la diagenèse de la matière organique des sédiments paléozoïques du bassin de Sbaa répond aux préoccupations suivantes:

- * déterminer l'origine et le degré d'évolution du contenu organique des réservoirs et des roches mères éventuelles;

- * essayer d'établir des corrélations entre le contenu organique des réservoirs et celui des éventuelles roches mères;

- * reconstituer une partie de l'histoire thermique du bassin et étudier l'influence de celle-ci sur la formation et l'accumulation des gisements d'huile.

Dans ce chapitre seront présentés les résultats de l'étude géochimique et pétrologique du contenu organique des réservoirs et des roches mères éventuelles; ainsi qu'il a été précisé dans l'introduction, ces résultats seront interprétés dans la dernière partie de ce mémoire.

II- MATIERE ORGANIQUE DES ROCHES MERES POTENTIELLES

II-1- Etude pétrologique

II-1-1- Description du cortège organique

• II-1-1-1- En lumière réfléchie

La description morphologique du cortège organique des échantillons a été faite, en lumière réfléchie naturelle et ultra-violette, d'après la classification macérale du Lexique International de Pétrographie des Charbons (1963, 1971, 1975).

L'étude a été menée sur des concentrés densimétriques pour le Tournaisien, le Strunien et le Famennien, et à la fois sur roches brutes et sur concentrés densimétriques pour le Frasnien, le Givétien et le Silurien. Rappelons que le concentré densimétrique ne représente pas la totalité du cortège organique de la roche (voir paragraphe A-1-2 ci-dessus).

* Tournaisien-Strunien-Famennien

89 échantillons représentant ces étages ont été étudiés. Les concentrés obtenus sont en général abondants et très variés quant à leur composition. Ce sont les macéraux du groupe de l'exinite qui sont, le plus souvent, majoritaires; sont notamment présents:

* de nombreuses microspores (dont quelques-unes trilètes et ornementées), associées à des mégaspores dans certains niveaux, dont les teintes de fluorescence vont du jaune au jaune brun (voir photo II-B)

* des algues:

des Tasmanacées sont présentes, en quantité plus ou moins importante, dans pratiquement tous les échantillons étudiés. Pour le Tournaisien et le Strunien, le genre a été précisé par l'étude palynologique (voir paragraphe II-1-1-2 ci-dessous); il s'agit de *Tapajonites* et de *Maranhites*. Les Tasmanacées du Tournaisien présentent deux teintes de fluorescence, l'une, jaune vif, l'autre, majoritaire, jaune à jaune brun; cette dernière correspond probablement à du matériel altéré. Pour le Strunien et le Famennien, les teintes de fluorescence sont plus homogènes: jaune à jaune brun.

des Botryococcus présents dans quelques niveaux de ces étages. Ils sont plus abondants au sommet (Tournaisien), où ils présentent des teintes de fluorescence plus homogènes que les Tasmanacées des mêmes niveaux. Ils deviennent plus rares dans les échantillons du Strunien et du Famennien.

* de la résinite se présentant sous deux formes: d'une part des particules ovoïdes, de dimensions allant de 10 à 100 μm , très souvent bordées de pyrite, gris sombre en lumière réfléchie naturelle et possédant une fluorescence jaune brun; d'autre part, des particules de formes variées pouvant atteindre 200 à 300 μm et dont les teintes de fluorescence varient du jaune vert au brun (voir photos II-C et II-D).

* de nombreux débris d'exinite de nature non identifiable du fait de la fragmentation; c'est ce que l'on nomme de la liptodétrinite.

* au niveau des "Grès de Sbaa" (base du Tournaisien), des particules arrondies, très souvent craquelées, et dont le coeur, très réfléchissant et non fluorescent, contient parfois des inclusions minérales (?). La périphérie de ces particules est gris sombre en lumière réfléchie naturelle et présente une zonation concentrique de ses teintes de fluorescence, qui vont du jaune à l'extérieur au brun à l'intérieur (voir photos II-C et II-D)..

Il s'agit vraisemblablement de bitumes qui se seraient formés sous l'influence d'une source minérale radioactive "fossilisée" sous forme d'inclusions. Nous n'avons malheureusement pas pu identifier ces inclusions à la microsonde électronique à cause d'une "ébullition" des bitumes du fait de la haute-tension. Toutefois, les diagraphies indiquent, dans tous les sondages, une forte radioactivité à ce niveau.

PLANCHE I

TASMANACEES DU SILURIEN DU BASSIN DE SBAA (SONDAGE OTLA-1)

-A- Concentré de Tasmanacées (1596,80m) observé en lumière transmise.
Le grand côté de la photo représente 1,2mm.

-B- Disposition des Tasmanacées au sein de la matrice argileuse
(1596,80m). Lumière réfléchie.
Le grand côté de la photo représente 1,2mm.

-C- Aspect du même échantillon en fluorescence.
Le grand côté de la photo représente 360 μ m.

-D- Tasmanacée du même échantillon à plus fort grossissement, en
fluorescence.
Le grand côté de la photo représente 72 μ m.

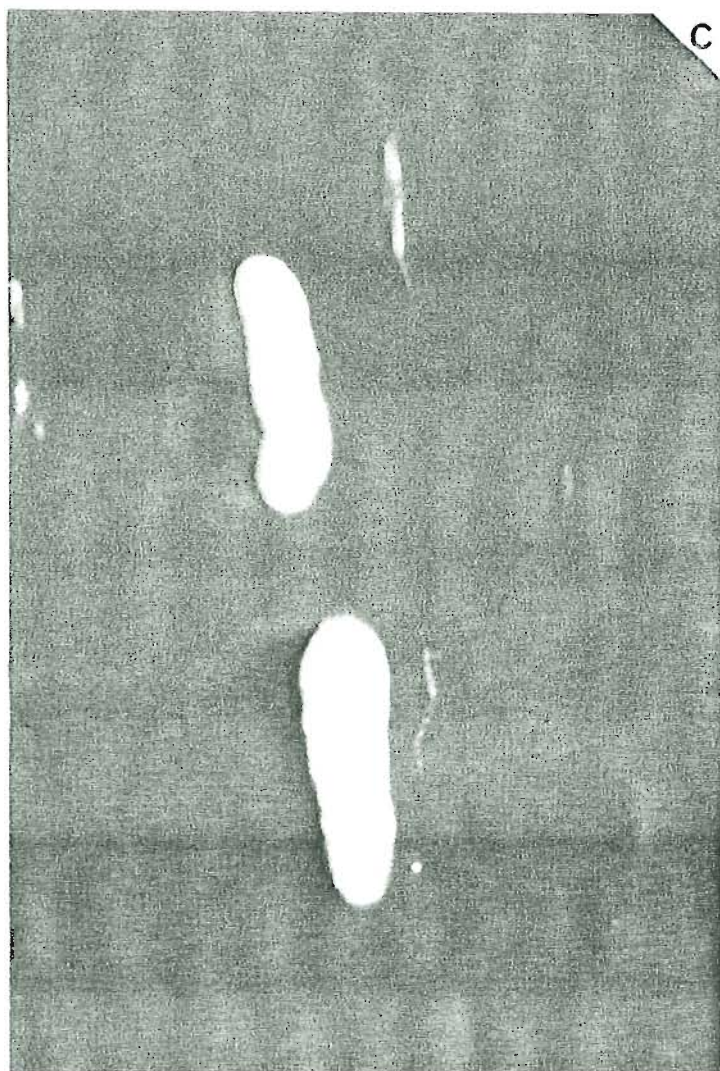
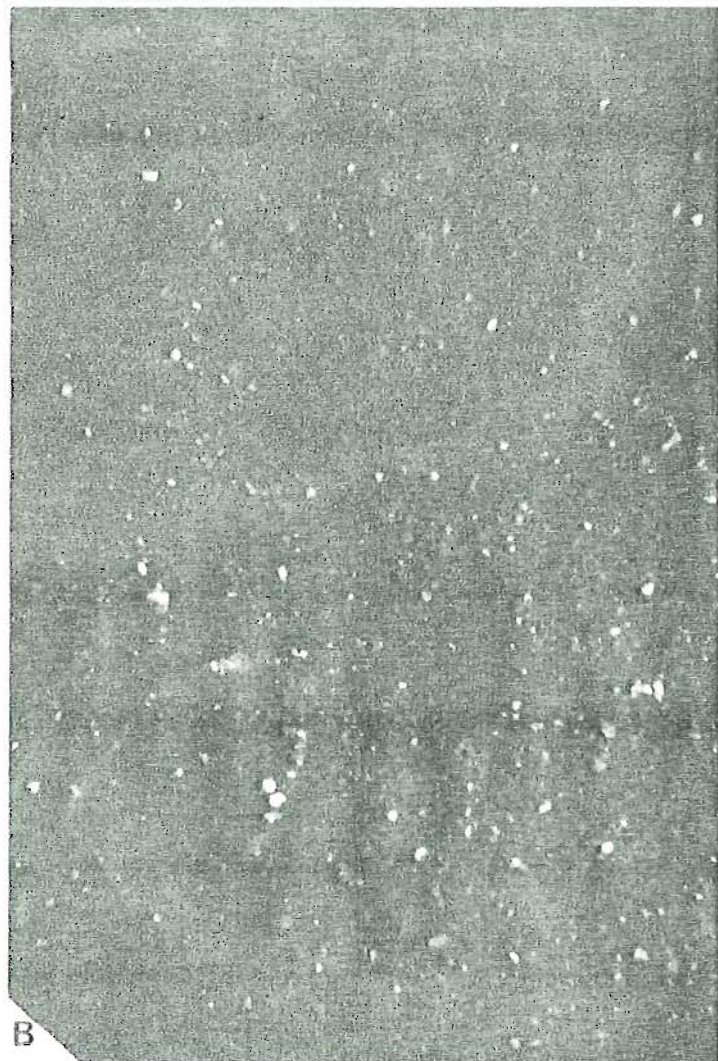
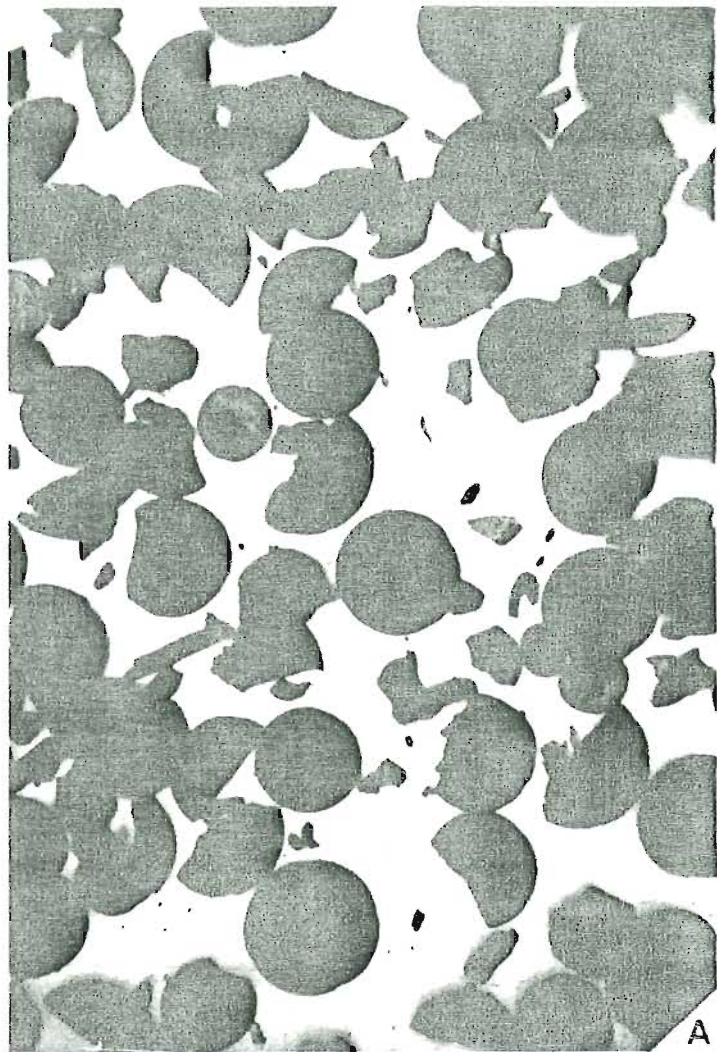


PLANCHE II
ASPECT MICROSCOPIQUE DU CONTENU ORGANIQUE DES SEDIMENTS
DU BASSIN DE SBAA (SONDAGE SBAA-1)

-A- Vue en lumière réfléchie montrant l'abondance du matériel remanié et/ou de la vitrinite atypique dans un concentré densimétrique du Tournaisien (421,20m).

Le grand côté de la photo représente 90 µm.

-B- Vue en fluorescence montrant la variété des macéraux du groupe de l'exinite dans un concentré densimétrique du Strunien (644,80m): Tasmanacée -t-, microspore à exine stratifiée -s-, cuticule (?).

Le grand côté de la photo représente 90 µm.

-C- et -D- Formation des "Grès de Sbaa".

Au centre de ces photos, on observe des bitumes irradiés (par des minéraux radioactifs ?); le coeur, qui est plus irradié, est plus réfléchissant (-C-) et moins fluorescent (-D-).

En bas, à gauche de ces photos, on observe une grande particule de résinite bordée de pyrite.

Le grand côté de ces photos représente 72 µm.

-C- Lumière réfléchie.

-D- Fluorescence.

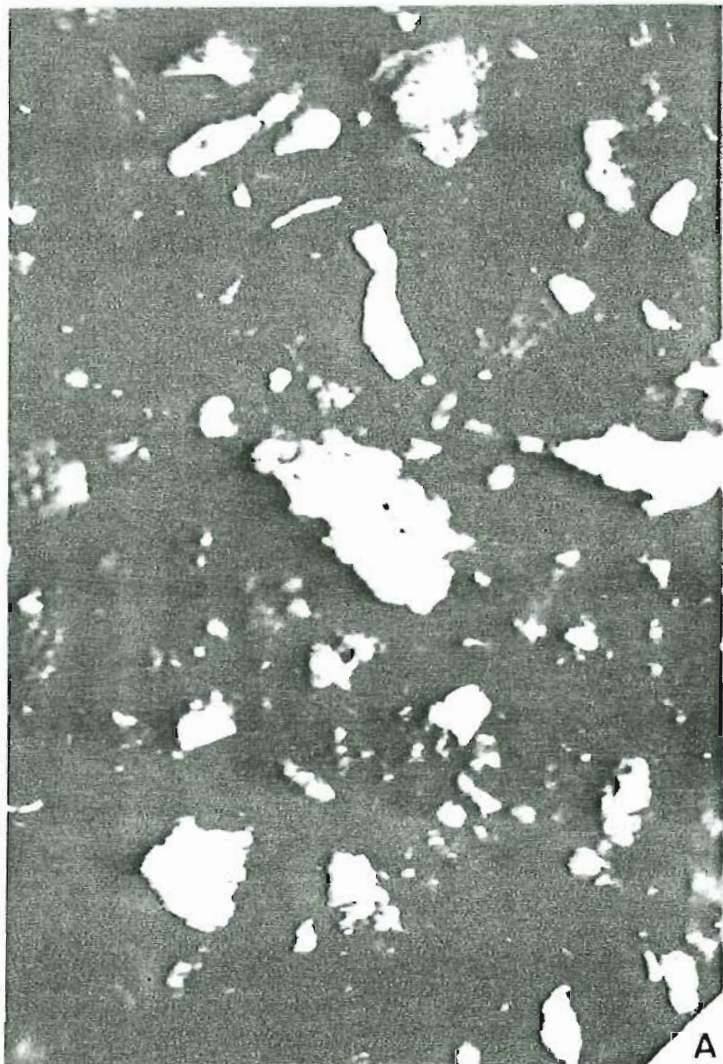


PLANCHE III
ASPECT MICROSCOPIQUE DU CONTENU ORGANIQUE DES SEDIMENTS
DU BASSIN DE SBAA

-A- Vue en fluorescence de la matrice organo-minérale stratifiée (contenant quelques grains de carbonates ??) du Givétien du sondage Sbaa-1 (1319,50m).

Le grand côté de la photo représente 90 µm.

-B- Disposition au sein de la matrice du matériel organique très réfléchissant du Silurien du sondage ODZ-1 (2107,30m). Lumière réfléchie.

Le grand côté de la photo représente 72 µm.

-C- et -D- Vues en lumière réfléchie (**-C-**) et en fluorescence (**-D-**) d'une Tasmanacée du Silurien du sondage Sbaa-1 (1331,40m). L'algue est située entre un niveau à grains fins (argilite) et un niveau à grains plus grossiers (siltite) dont la porosité semble envahie par des hydrocarbures apparaissant verts en fluorescence (photo **D**). Pyrite très abondante.

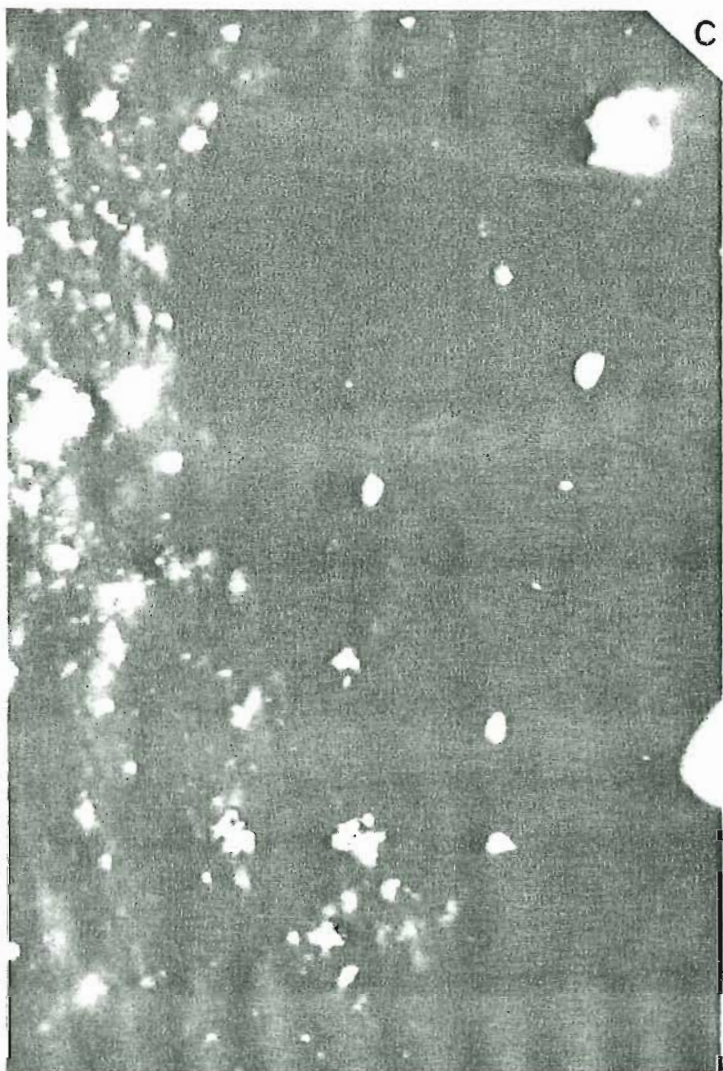
Le grand côté des photos représente 72 µm.



A



B



C



D

Les macéraux du groupe de l'inertinite sont également abondants dans les échantillons de ces étages. Ils sont essentiellement représentés par du matériel très fin, à fort relief (inertodétrinite), accompagné de quelques fragments de tissus fusinisés.

En ce qui concerne les macéraux du groupe de la vitrinite, leur identification est difficile dans tous les échantillons de ces étages. En effet, ils se présentent sous la forme de particules allongées, de petite taille (10 à 20 μm), assez homogènes, plus ou moins poreuses, de réflectance généralement élevée, et souvent bordées de microcristaux de pyrite. Il s'agit probablement, pour la plupart, de matériel remanié (voir photo II-A), qui devient très dominant parmi la vitrinite dans la partie sud du bassin.

* Frasnien

Un seul échantillon de cet étage a été observé (n° 69; Sbaa-3; 1290m). L'essentiel du contenu organique est représenté par des Tasmanacées, accompagnées de débris liptinitiques et de quelques fragments anguleux de vitrinite atypique. Les Tasmanacées sont nettement moins fluorescentes que celles des niveaux précédents.

* Givétien

5 échantillons de cet étage ont été étudiés. L'observation des sections polies de roches brutes montre que le matériel organique amorphe est dominant et présente une teinte de fluorescence jaune vif (photo III-A). Ce matériel s'organise en petits lits discontinus interstratifiés avec des lamines minérales reconnues carbonatées par l'étude en lumière polarisée (voir paragraphe II-2 de la Deuxième partie).

De nombreuses Tasmanacées s'intercalent dans ces lits; leur fluorescence est beaucoup moins intense que celle des lits et que celles des Tasmanacées des niveaux précédents. Autour de ces Tasmanacées, on observe des halos diffus

et très fluorescents qui correspondent probablement à des suintements d'huile. Des petites particules isolées de vitrinite atypique et de liptodétrininite, à fluorescence jaune orangé, sont disséminées dans la roche.

* Silurien

La matière organique de cet étage a été observée dans 14 concentrés densimétriques et 3 échantillons de roche brute.

Le matériel organique des concentrés densimétriques est composé exclusivement de Tasmanacées (voir photos III-C et III-D) dont la réflectance et la fluorescence évoluent avec la profondeur, en l'espace de 100 m environ, respectivement du gris sombre au gris assez clair, et du jaune brun au brun très sombre. L'étude palynologique a permis d'identifier le genre de ces Algues: il s'agit de *Tasmanites* (voir paragraphe II-1-1-2 ci-dessous). Quelques-unes d'entre elles sont bordées de microcristaux de pyrite. Notons qu'au sud du bassin (sondage OTLA-1), les Tasmanacées de cet étage sont beaucoup plus fluorescentes (voir photos I-C et I-D).

On observe également de rares particules de vitrinite atypique, de petite taille (10 à 20 µm maximum), anguleuses et assez réfléchissantes.

L'observation des sections polies de roches brutes montre que dans les niveaux les plus fins (argillites), les Tasmanacées, la liptodétrininite et la matière organique amorphe forment des lits plus ou moins continus, conformes à la texture de la roche; cette disposition a également été observée en lumière polarisée (voir paragraphe II-2 de la Deuxième partie). Dans les niveaux silteux, la porosité est occupée par de la matière organique diffuse, très fluorescente, parfois accompagnée de quelques Tasmanacées; cette matière organique pourrait être assimilée à des exsudats (voir photo III-D).

L'un des échantillons étudiés correspond au passage Silurien-Ordovicien (n° 89; ODZ-1; 2107,30m). Son concentré densimétrique est exclusivement constitué de particules très réfléchissantes, plus ou moins bombées et altérées. L'observation de la roche brute (voir photo III-B) montre que ce matériel organique remplit la porosité entre les grains de quartz identifiés en lumière polarisée (voir paragraphe II-2 de la Deuxième partie).

• 11-1-1-2- En lumière transmise

Pour compléter les résultats précédents, nous avons effectué l'étude palynologique, en lumière transmise, des mêmes niveaux, notamment dans le but de déterminer leur palynofaciès; ce dernier est, d'après la définition de Combaz (1980), la description de l'aspect des constituants organiques d'une roche et l'estimation de leurs proportions relatives. Dans notre cas, nous n'avons évalué approximativement que les proportions relatives de la matière organique sapropélique et de la matière organique continentale, en comptant dans cette dernière les constituants suivants:

- * débris à structure reconnaissable d'origine végétale (tissus, cuticules, spores, etc.);
- * matière organique charbonneuse (débris noirs opaques);
- * matière organique ligneuse (fragments de trachéides, vaisseaux ou fibres de bois, etc.)

Par ailleurs, la répartition du matériel organique dans la texture des roches a été observée en lumière polarisée, et est décrite dans le paragraphe 11-2 de la Deuxième partie.

* Tournaisien

Les associations palynologiques rencontrées dans les sédiments de cet étage sont constituées, pour la plupart, par les éléments continentaux suivants:

- * de nombreuses spores dont les plus caractéristiques sont *Maltzispora* sp. (photo IV-A) et *Vallatisporites vallatus* (photo IV-B). Ces spores sont parfois abîmées et assez sombres (brunâtres);
- * quelques débris de mégasporés;
- * de nombreux petits débris ligneux noirâtres;
- * de rares Scolécodontes.

Associés à ces éléments continentaux, on observe des formes marines: de rares Tasmanacées (*Tapajonites*) et de très rares Acritarches. La matière organique amorphe, de couleur jaune orangée, représente généralement 10 à 15 % du contenu organique total. Cependant, à la base de cet étage, dans les "Grès de Sbaa", cette proportion peut atteindre 45 à 50 %; parallèlement, les Acritarches deviennent plus abondants (*Verghachium* sp., *Baltisphaeridium* et *Michrystidium*).

* Strunien

D'une manière générale, la matière organique figurée de cet étage est relativement mieux conservée que celle du Tournaisien. La proportion de la matière organique continentale (spores et débris ligneux) diminue légèrement par rapport à l'étage précédent.

Les formes les plus caractéristiques sont *Spelaeotriletes lepidophytus* (photo IV-E), *Punctatisporites glaber* (photo IV-H) et *Dictyotriletes fimbriatus* (photo IV-F). De nombreux débris de mégaspores et de cuticules sont présents. On observe également fréquemment des colonies de Botryococcacées. Quelques Scolécodontes (photo V-M).

Le matériel planctonique marin représente généralement 25 à 30 % du contenu organique total. Il est constitué par de nombreux Acritarches (*Verghachium*, photo V-B; *Umbellasperidium*; etc.) , de fréquentes Tasmanacées (essentiellement *Tapajonites mosesii* et *Maranhites*; photos V-H et V-A) et de très rares Chitinozoaires.

* Famennien

Seuls 3 échantillons de cet étage ont été observés, et la microflore n'en a pas été précisément identifiée. Nous constatons néanmoins que le rapport entre la matière organique amorphe et planctonique et les éléments organiques continentaux reste sensiblement le même que dans l'étage précédent.

Des spores, souvent abîmées et brunâtres, de formes variées, sont dominantes. Les débris ligneux allongés sont assez fréquents. Présence d'Acritarches, de Tasmanacées et de matière organique amorphe.

PLANCHE IV

PRINCIPALES SPORES DU TOURNAISIEN, DU STRUNIEU ET DU
SILURIEN DU BASSIN DE SBAO OBSERVEES EN LUMIERE TRANSMISE

- A- *Maltzispore* sp. ; Sbaa-1; 471,50m (échantillon n°5)
- B- *Vallatisporites vallatus* ; Sbaa-3; 397,00m (éch. n°58)
- C- *Punctatisporites glaber* ; Sbaa-1; 471,50m (éch. n°5)
- D- *Densosporites variomarginatus* ; Sbaa-1; 502,80m (éch. n°6)
- E- *Spelaeotriletes lepidophytus* ; Sbaa-1; 569,00m (éch. n°10)
- F- *Dictyotriletes fimbriatus* ; Sbaa-1; 569,00m (éch. n°10)
- G- *Lophozonotriletes cristifer* ; Sbaa-1; 637,80m (éch. n°14)
- H- *Punctatisporites glaber* ; Sbaa-1; 540,60m (éch. n°8)
- I- *Fusulatisporites gibberosus* ; Sbaa-1; 569,00m (éch. n°10)
- J- *Cymbosporites famenensis* ; Sbaa-1; 569,00m (éch. n°10)
- K- *Knoxisporites hederatus* ; Sbaa-1; 569,00m (éch. n°10)
- L- *Hymenozonotriletes explanatus* ; Sbaa-1; 569,00m (éch. n°10)
- M- *Retusotriletes marringtonii* ; OTLA-1; 1590,30m (éch. n°91)
- N- *Ambitlisporites dilutus* ; Sbaa-1; 1328,80m (éch. n°21)
- O- *Emphanisporites* sp. ; OTLA-1; 1590,30m (éch. n°91)

GROSSISSEMENT x500

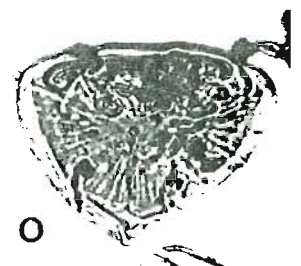
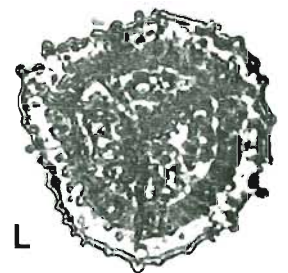
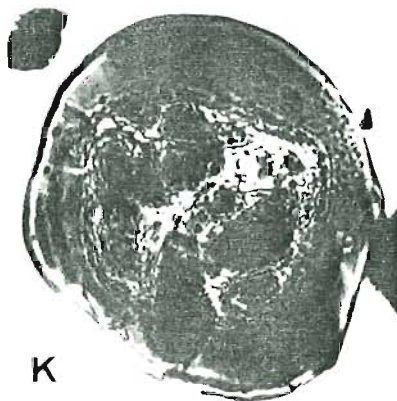
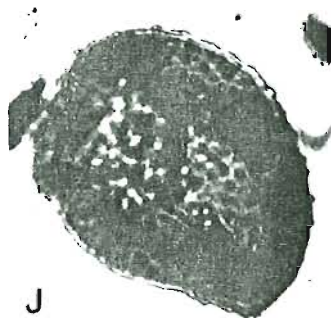
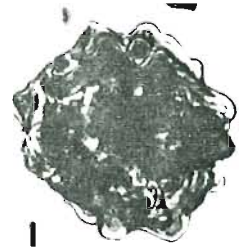
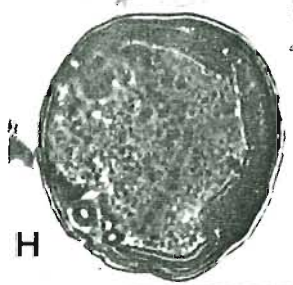
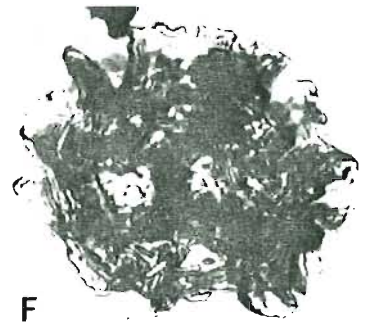
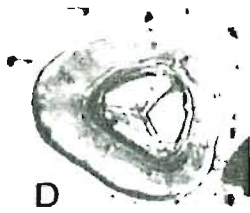
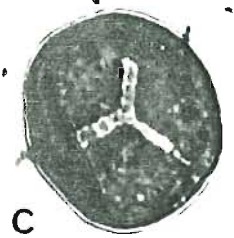
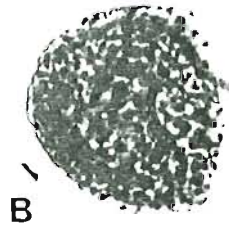
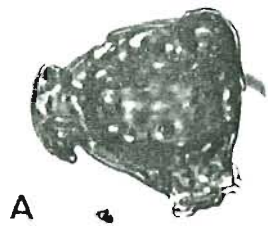
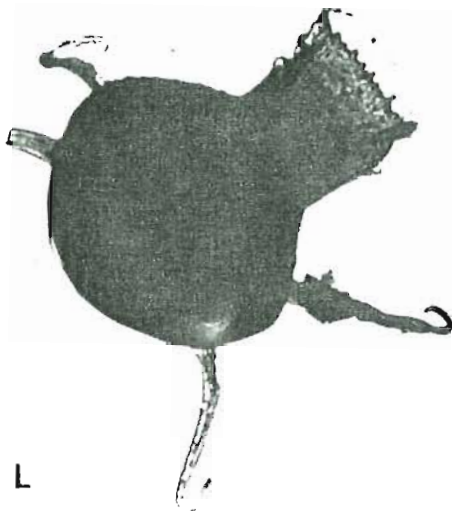
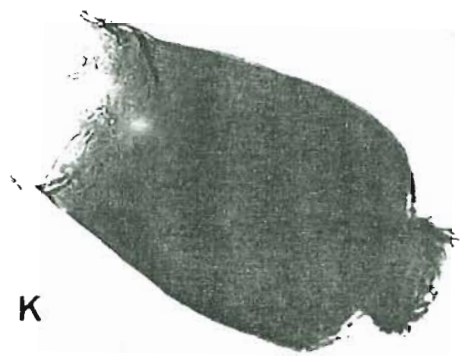
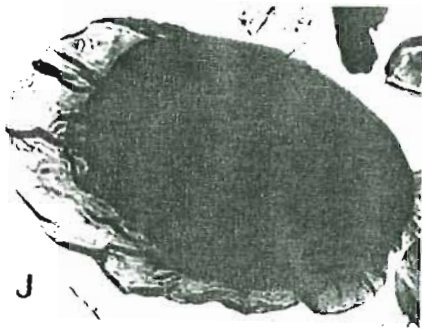
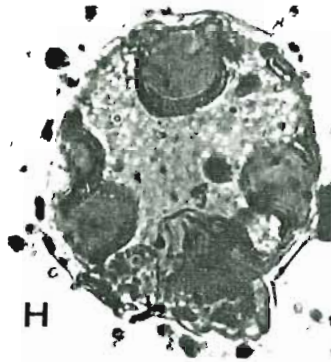
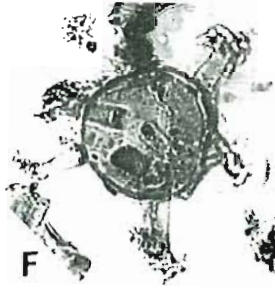
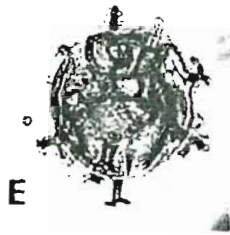
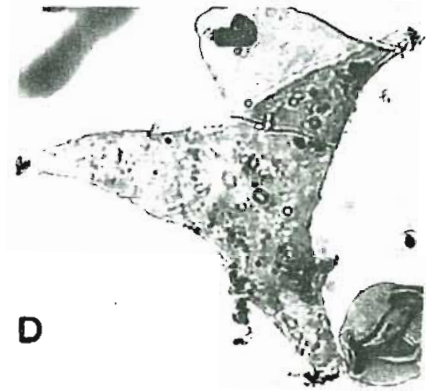
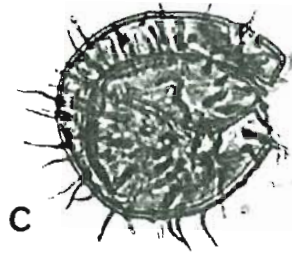
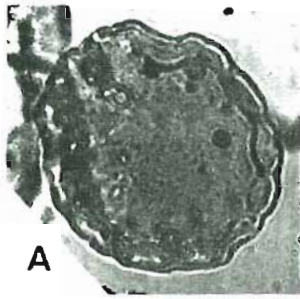


PLANCHE V
PRINCIPALES FORMES PLANCTONIQUES DU STRUNEN ET DU
SILURIEN DU BASSIN DE SBAA OBSERVEES EN LUMIERE TRANSMISE

- A- *Maranhites* ; Sbaa-1; 540,60m (échantillon n°8)
- B- *Ueryhachium* ; Sbaa-1; 540,60m (éch. n°8)
- C- *Borgonispæridium winslowii* ; Sbaa-1; 569,00m (éch. n°10)
- D- *Onondagella deunffi* ; OTLA-1; 1590,30m (éch. n°91)
- E- *Cymbospæridium carinosum* ; OTLA-1; 1594,10m (éch. n°93)
- F- *Cymbospæridium pillaris* ; OTLA-1; 1594,10m (éch. n°93)
- G- *Donia* ; OTLA-1; 1592,40m (éch. n°92)
- H- *Tapajonites mosesii* ; Sbaa-1; 637,80m (éch. n°14)
- I- *Tasmanites* ; OTLA-1; 1590,30m (éch. n°91)
- J- *Pterochitina perivelata* ; OTLA-1; 1590,30m (éch. n°91)
- K- *Desmochitina urna* ; OTLA-1; 1590,30m (éch. n°91)
- L- *Ancyrochitina* ; OTLA-1; 1590,30m (éch. n°91)
- M- Scolécondonte ; Sbaa-1; 540,60m (éch. n°8)

GROSSISSEMENT x500, SAUF PHOTO I: x400



* Frasnien

La matière organique de cet étage n'a pas été étudiée du point de vue palynologique.

* Grévénien

Le contenu organique de cet étage est essentiellement de la matière organique amorphe se présentant sous la forme d'amas floconneux très sombres. Seuls quelques éléments figurés sont présents: débris de spores (5 % environ du contenu organique), Tasmanacées, Acritarches.

* Silurien

Le kérogène brut extrait des échantillons de cet étage contient de la matière organique amorphe en abondance, sous forme d'amas denses.

Les éléments figurés n'ont pu être identifiés que dans le résidu palynologique (voir paragraphe A-1-3 de cette partie): on distingue essentiellement des Tasmanacées, des Acritarches et des Chitinozoaires, ainsi que quelques spores.

Les Chitinozoaires sont très nombreux et variés: *Pterochitina perivelata* forme classique du Silurien supérieur (photo U-J), *Anchyrochitina* (photo U-L) et *Desmochitina urna* (photo U-K).

Parmi les nombreux Acritarches présents, on distingue deux formes caractéristiques du Silurien: *Cymbosphaeridium carinosum* (photo U-E) et *Cymbosphaeridium pilaris* (photo U-F).

Les Tasmanacées (*Tasmanites* ; photo U-I) sont également abondantes, de couleur brun foncé à Sbaa-1 et jaune orangé à OTLA-1.

Parmi les très rares spores présentes, on a pu identifier *Emphanisporites* (photo UV-D).

11-1-2- Etude réflectométrique

Le pouvoir réflecteur de la vitrinite des charbons, qui augmente parallèlement à leur évolution diagénétique (Teichmüller, 1958; Alpern, 1967), est maintenant un paramètre de rang bien connu. Ceci a été largement exploité pour étudier la matière organique dispersée dans les sédiments (Bartenstein et Teichmüller, 1974; Alpern et Cheymol, 1978).

Dans le cas de notre étude, les mesures de réflectométrie n'ont été effectuées que sur les sédiments du Tournaisien et du Dévonien supérieur, étant donné que les végétaux supérieurs, dont dérive la vitrinite, ne sont pas connus avant cette époque.

Par ailleurs, nous avons vu dans le paragraphe 11-1-1-1 ci-dessus que le matériel réfléchissant (vitrinite) est, non seulement minoritaire, mais également douteux quant à son origine. Aussi, l'étude réflectométrique de nos sédiments ne pouvait s'appuyer sur aucun critère morphologique pour dégager la population de vitrinite représentative du degré d'évolution diagénétique.

Nous n'avons donc distingué des populations qu'en nous basant sur l'allure des réflectogrammes, c'est à dire en fonction des modes apparents. Il va de soi que ces distinctions sont purement arbitraires du point de vue morphologique et qu'elles ne permettent pas de tirer de conclusion significative.

Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau 1.

Pour le Tournaisien, le pouvoir réflecteur varie entre 0,45 et 0,81 % pour la première des deux populations distinguées, avec un écart-type de 0,02 à 0,17, et de 0,90 à 1,26 %, avec un écart-type de 0,04 à 0,16, pour la seconde.

Pour le Strunien, les valeurs de réflectance semblent relativement moins dispersées. On distingue une première population entre 0,48 et 0,59 % (écart-type: 0,1 environ) et une seconde à 1 % de pouvoir réflecteur.

11-1-3- Etude microspectrofluorimétrique

Dans le cas de sédiments contenant de la matière organique dispersée, l'identification du matériel lignocellulosique autochtone sur lequel les mesures de réflectance sont effectuées est souvent difficile (voir paragraphe précédent).

Pour surmonter ces difficultés, une autre technique permettant d'évaluer le degré de maturation de la matière organique des sédiments a été développée, la microspectrofluorimétrie (voir paragraphe A-1-2-2 de cette partie). Elle a été jusqu'à présent appliquée aux différents macéraux du groupe de l'exinite: les

N°	Profondeur (m)	R1 (%)	E1	N1	R2 (%)	E2	N2	
1	416,50	0,73	0,14	59	1,12	0,08	16	TOURNAISIEN
1'	419,20	0,73	0,13	64	1,14	0,09	16	
2	421,20	0,74	0,14	63	1,10	0,07	18	
2'	456,60	0,82	0,17	109	1,17	0,05	13	
3	459,60	0,71	0,65	27	0,98	0,05	19	
5	467,50	0,79	0,15	93	1,27	0,08	15	
6	502,80	0,75	0,13	66	1,21	0,14	37	
6'	513,00	0,47	0,06	46	-	-	-	
6''	525,00	0,54	0,08	42	0,83	0,07	8	
8'	544,60	0,51	0,13	30	-	-	-	
12	629,80	0,48	0,11	37	-	-	-	STRUNIEN
14	637,80	0,60	0,11	45	0,98	0,13	9	
15	641,80	0,54	0,10	45	1,01	0,04	6	

Tableau 1 : Résultats de l'étude réflectométrique des sédiments du Tournaisien et du Strunien du sondage SBAA-1.

(R= réflectance; E= écart-type; N= nombre de mesures)

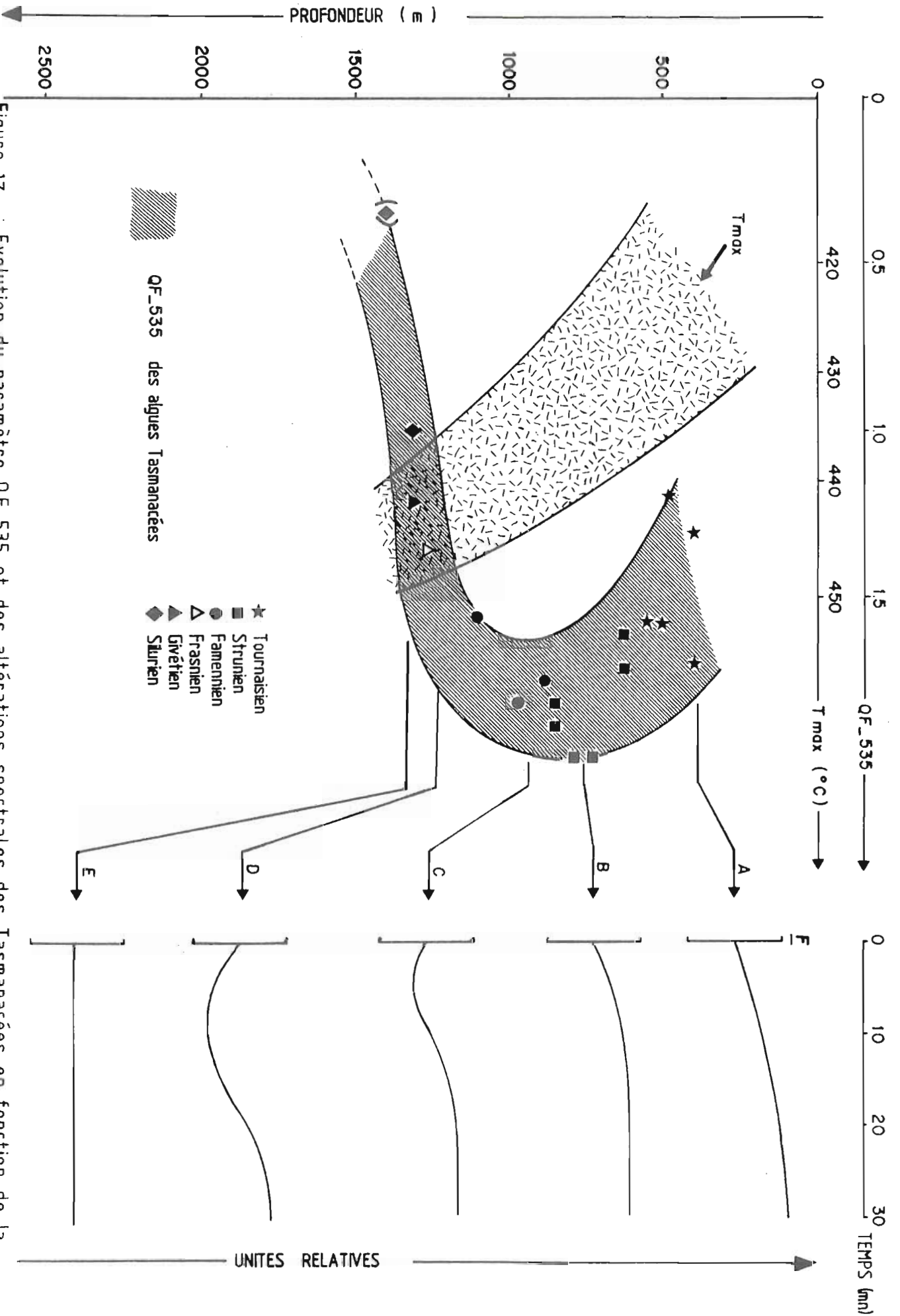
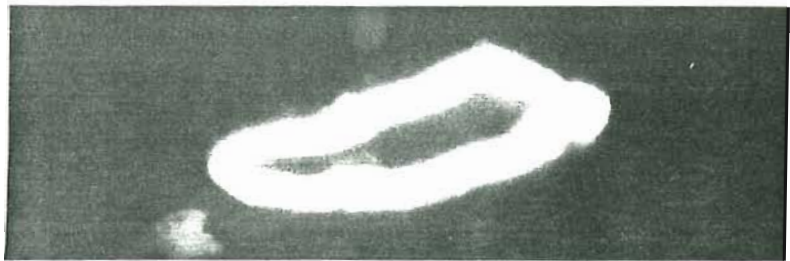
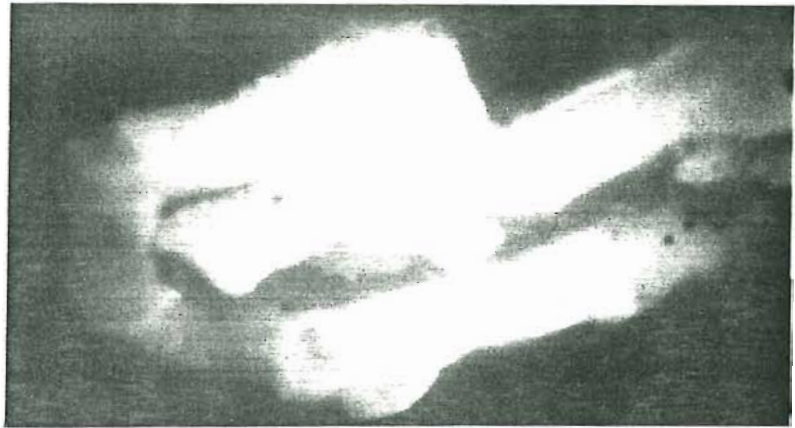


Figure 17 : Evolution du paramètre QF-535 et des altérations spectrales des Tasmanacées en fonction de la profondeur (modifié d'après Bertrand et Al., à paraître). L'évolution de la fluorescence des Tasmanacées des niveaux A,B,C,D,E, est illustrée dans la planche ci-contre.

A



B



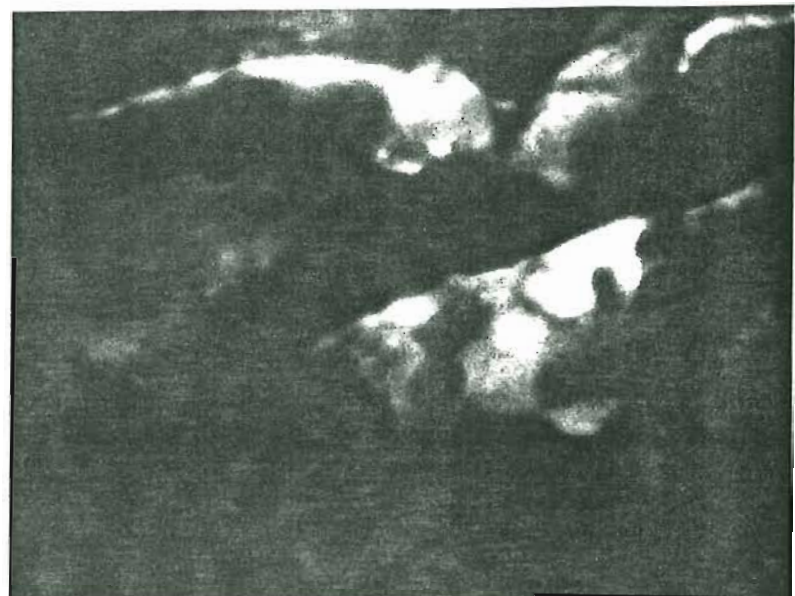
C



D



E



Algues (Allan et al., 1980), les cutinites et les sporinites (Teichmüller, 1982; Teichmüller and Durand, 1983), etc.

Récemment, Bertrand et al. (1986) ont montré que la fluorescence d'une matière organique sédimentaire est liée, outre à sa composition chimique, aux proportions relatives du kérogène et des bitumes.

Dans le cas des sédiments du bassin de Sbaa, nous avons vu, dans le paragraphe 11-1-1 ci-dessus, que le matériel algaire (Tasmanacées) est abondant et de caractère autochtone dans la plupart des niveaux. Contrairement à la réflectométrie, la microspectrofluorimétrie présente donc l'intérêt de pouvoir être effectuée sur une population homogène d'Algues dont nous pouvons ainsi suivre l'évolution diagénétique.

Les Tasmanacées étudiées sont probablement du genre *Tapajonites* et *Maranhites* dans les niveaux du Tournaisien et du Strunien et du genre *Tasmanites* pour le Silurien (voir paragraphe 11-1-1-2 ci-dessus). Toutefois, les observations en fluorescence ne permettaient pas de faire la distinction entre ces genres, sinon par la taille, *Tapajonites* et *Maranhites* étant plus petites.

Les résultats de l'analyse et de l'altération spectrales sont donnés dans la figure 17 et le tableau 2. Les résultats de l'altération monochromatique sont représentés dans la figure 19.

• 11-1-3-1- Analyse spectrale des Tasmanacées

La figure 17 montre qu'au cours de l'enfouissement, la fluorescence des Tasmanacées est caractérisée par une augmentation du rapport QF-535 jusqu'à une profondeur de 800 m, où il atteint un maximum, suivie de sa diminution rapide à partir de 1000-1100 m. Les valeurs du QF-535 sont relativement dispersées au sommet du Tournaisien. Ceci est probablement dû à l'altération des Algues observée en fluorescence (voir paragraphe 11-1-1-1 ci-dessus).

D'autres paramètres (L_{max} 95%, Q650/500) présentent globalement la même évolution que le QF-535 (tableau 2). Par contre, les valeurs du flux d'émission varient d'une manière aléatoire, ce qui pourrait être expliqué par des différences d'épaisseur des objets analysés. En effet, ce paramètre semble dépendre du volume excité par le faisceau ultra-violet incident (Pradier et al., 1987).

Par ailleurs, Bertrand (1986) a montré que le début de la diminution du rapport QF-535 correspond au stade où les Algues commencent à produire des hydrocarbures, ce qui a été nommé "blue-shift" par cet auteur. Cette diminution se produit quand la part de la fluorescence due aux hydrocarbures

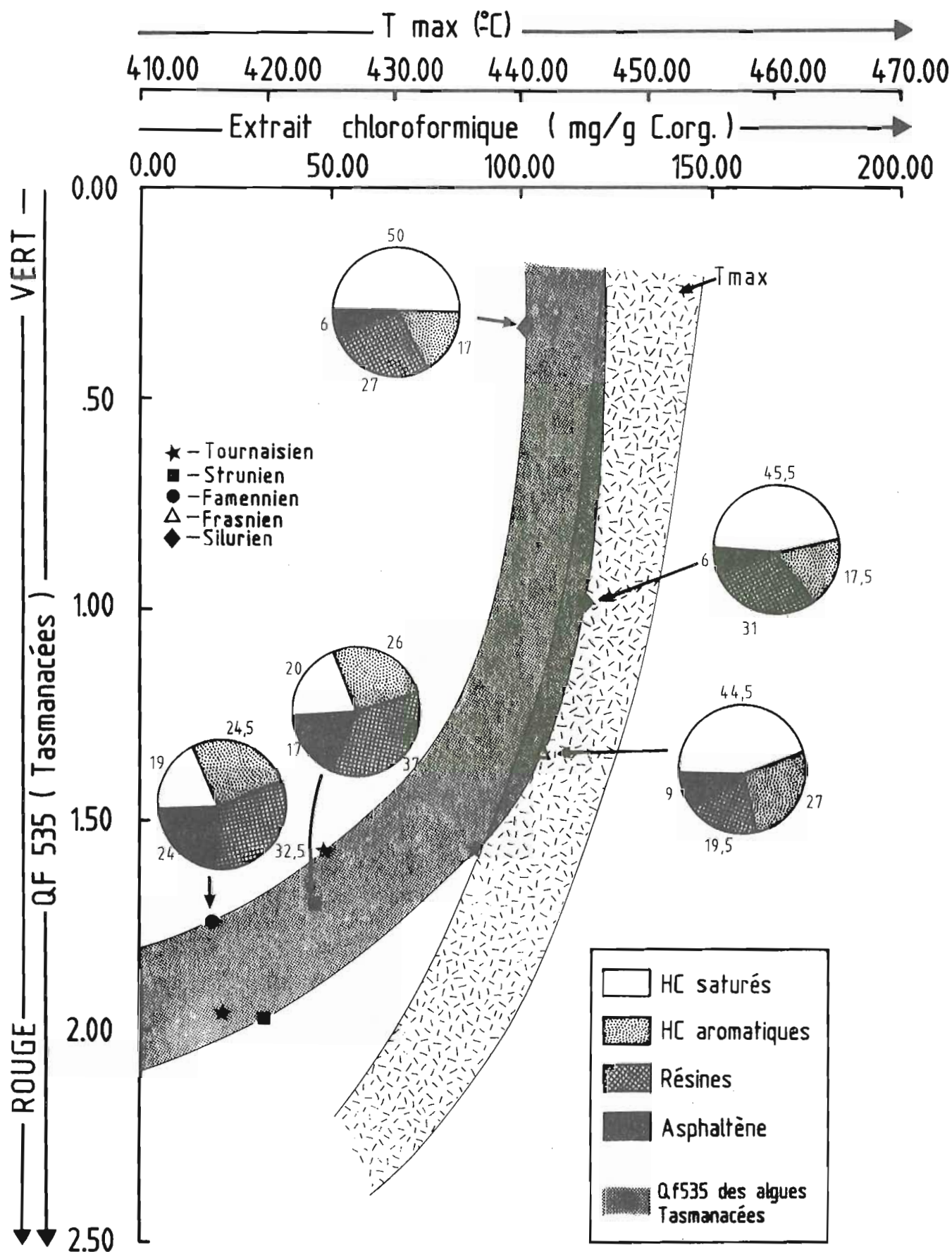


Figure 18 : Evolution du paramètre QF-535 en fonction de l'extrait chloroformique et des pourcentages pondéraux des différentes fractions de cet extrait.

formés devient plus importante que celle des kérogènes (Bertrand et al., à paraître).

Ces résultats sont confirmés par notre étude, puisque la profondeur à laquelle le "blue-shift" se produit dans les sédiments de la cuvette de Sbaa (1100-1200m; voir figure 17) est caractérisée par:

(1) la présence d'hydrocarbures observables en fluorescence (voir paragraphe 11-1-1-1 ci-dessus);

(2) des Tmax de pyrolyse Rock-Eval variant entre 440 et 445°C, ce qui indique le début de la "fenêtre à huile" (voir paragraphe 11-2-1-2 ci-dessous);

(3) des quantités d'extrait chloroformique augmentant très rapidement avec la profondeur (figure 49). Notons que l'extrait chloroformique concerne l'ensemble de la roche alors que le QF-535 n'est lié qu'à une partie du contenu organique (Tasmanacées dans notre cas). Toutefois, cette corrélation reste valable étant donné que le maximum de production d'hydrocarbures a lieu au Givétien et au Silurien (figure 17) et que le contenu organique de ces étages est majoritairement formé par des Tasmanacées (voir paragraphe 11-1-1 ci-dessus); nous pouvons donc supposer qu'une grande part des hydrocarbures formés provient de ces Algues.

Nous avons donc reporté, dans la figure 18, ce même paramètre (QF-535) en fonction de l'extrait chloroformique ; l'évolution diagénétique y est représentée par l'augmentation du Tmax. Cette figure appelle les deux remarques suivantes:

- la diminution du QF-535 s'accompagne d'une augmentation de l'extrait chloroformique, ce qui est une confirmation supplémentaire des résultats de Bertrand et al. (à paraître);

- en ce qui concerne la composition de l'extrait, nous constatons que la diminution du QF-535 s'accompagne d'un enrichissement en hydrocarbures saturés. Ceci semble confirmer les résultats de Bertrand (1986) mettant en évidence le rôle important joué par l'environnement physico-chimique des chromophores dans leur fluorescence. En effet, d'après cet auteur, "la fluorescence d'une particule organique est la résultante des émissions propres à chacune des phases constitutives de cette particule"; dans notre cas, le déplacement du spectre d'émission de fluorescence (produit par les chromophores) vers les basses longueurs d'onde pourrait donc être dû à la modification, au cours de l'évolution diagénétique, des proportions relatives des différentes phases en présence, révélée par l'enrichissement en hydrocarbures saturés de l'extrait chloroformique.

● 11-1-3-2- Altérations monochromatique et spectrale des
Tasmanacées

Les résultats de l'altération monochromatique (à 535 nm) sont présentés dans la figure 19. Ils appellent les remarques suivantes:

* les courbes des niveaux supérieurs (Tournaisien) sont caractérisées par une augmentation continue de l'intensité de fluorescence dans l'intervalle de temps étudié (30mn);

* les échantillons des niveaux suivants, plus évolués, présentent une augmentation plus rapide de cette intensité, suivie d'une stabilisation au bout de 15 mn d'illumination;

* l'échantillon situé à 1331 m (Givétien) présente une altération d'abord négative, avec un minimum à 2 mn environ, puis positive à partir de 6 mn et augmentant avant de se stabiliser, à partir de 20 mn, à une intensité relative beaucoup plus faible que celle des niveaux supérieurs;

* le dernier échantillon, situé à 1418 m (Silurien) présente, quant à lui, une altération légèrement négative puis nulle.

D'après les travaux de Martinez et al. (1987) et de Pradier et al. (1987), il semble que des courbes du type de celles des échantillons 1331 m et 1418 m, indiquent la présence d'hydrocarbures.

Ceci est confirmé par les résultats de l'altération spectrale (figure 17 et montage photographique associé), qui montrent notamment, en ce qui concerne l'évolution cinétique du paramètre F:

* le niveau A (503 m, Tournaisien), qui précède le "blue-shift", présente une altération positive qui ne s'achève pas au bout de 30 mn d'illumination;

* le niveau B (745 m, Strunien), situé juste avant le "blue-shift", présente également une altération positive, qui tend à se stabiliser au bout de 15 mn environ;

* les niveaux C (1110 m, Famennien) et D (1290m, Frasnien) marquent le début du "blue-shift" avec une altération d'abord négative puis positive à partir de 10 mn (niveau C) et 20 mn (niveau D);

* le niveau E (1418 m, Silurien) est situé au-delà du "blue-shift" des Tasmanacées et ne montre pas de modification significative de son flux d'émission (très faible) avec le temps. Ceci laisse supposer que le niveau de maturation optimal des Tasmanacées est dépassé.

Nous pouvons donc déduire de ces résultats qu'une altération négative du spectre d'émission de fluorescence de ces Algues, qui correspond à un déplacement vers les courtes longueurs d'onde, traduit la présence d'hydrocarbures associés aux Tasmanacées analysées.

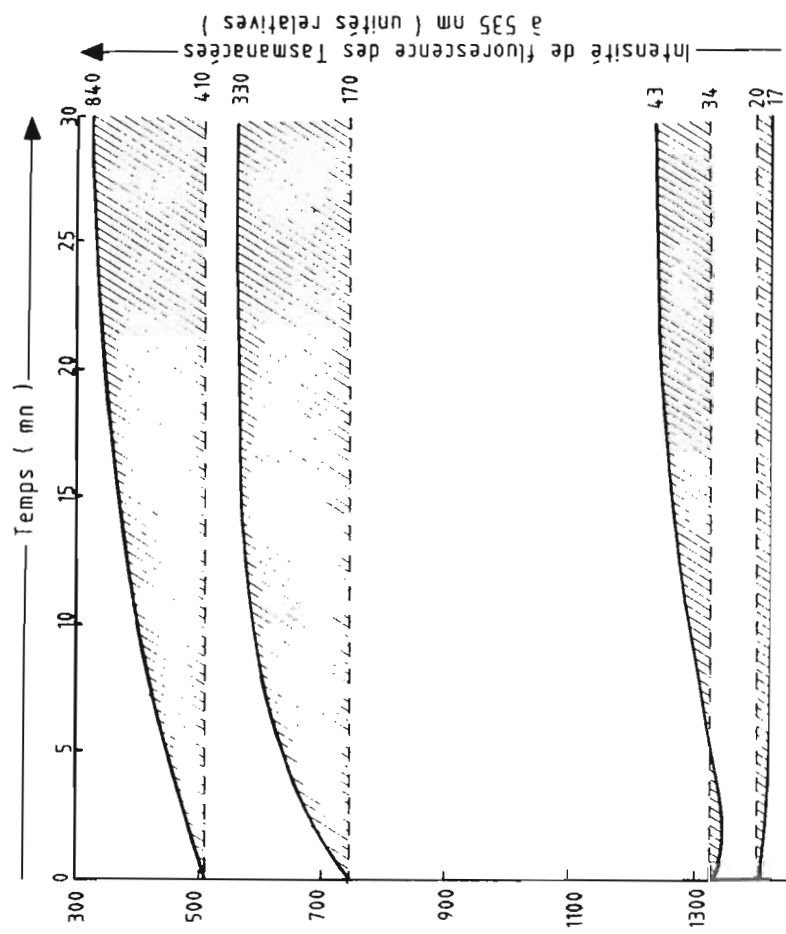
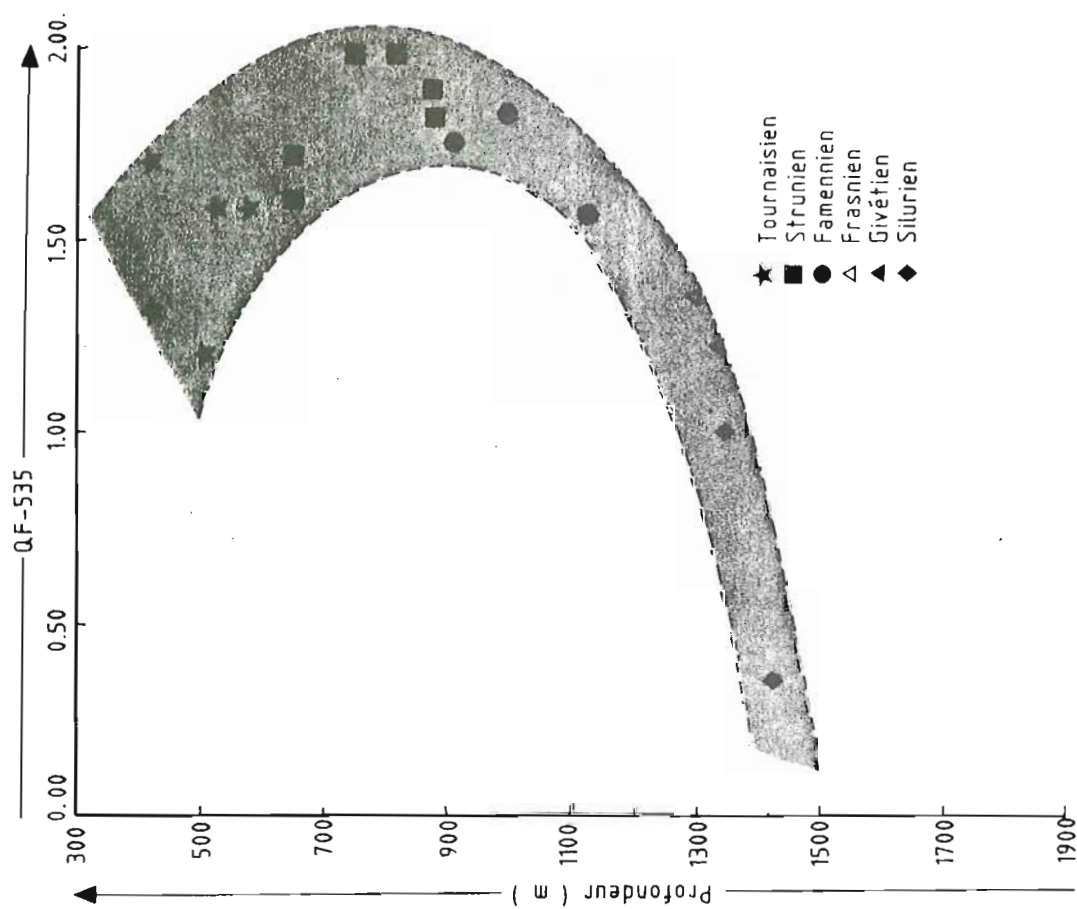


Figure 19 : Evolution du paramètre QF-535 et des altérations monochromatiques en fonction de la profondeur .

11-2- Etude géochimique

11-2-1- Caractérisation des roches brutes

● 11-2-1-1- Teneurs en carbone organique

Les résultats des analyses de carbone organique, effectués sur la roche brute et concernant les différents étages stratigraphiques recoupés par les sondages, sont représentés dans les tableaux 14 à 23 de l'annexe III et illustrés dans la figure 20.

L'examen de ces résultats analytiques montre que, d'une manière globale, les teneurs pondérales en carbone organique total ne présentent pas d'importantes variations d'un étage stratigraphique à un autre. Ces teneurs varient en moyenne de 0,5 % du poids de la roche à 2 %. Cependant, le Givétien présente une exception avec des valeurs de carbone organique variant de 1,5 % à 5,5 % du poids de la roche.

Notons, en outre, que cette analyse prend en compte tout aussi bien la matière organique autochtone (kénogène) qu'allochtone (huile de réservoir), ce qui constitue une limite à l'interprétation en termes de faciès.

Dans le détail, ces résultats examinés en fonction des étages stratigraphiques montrent:

a) Namurien:

Le carbone organique des sédiments du Namurien n'a été dosé que sur 4 échantillons au niveau du sondage de ODZ-1. Les teneurs en carbone organique sont relativement faibles: entre 0,41 et 0,82% (tableau 18).

b) Viséen-Tournaisien:

L'analyse du carbone organique a porté sur 42 échantillons. Les teneurs en carbone organique varient de 0,53 % à 1,64 % pour les faciès argileux et sont voisines de 0,30 % pour les faciès plus gréseux (tableaux 14, 15, 16, 17, 18 et 23).

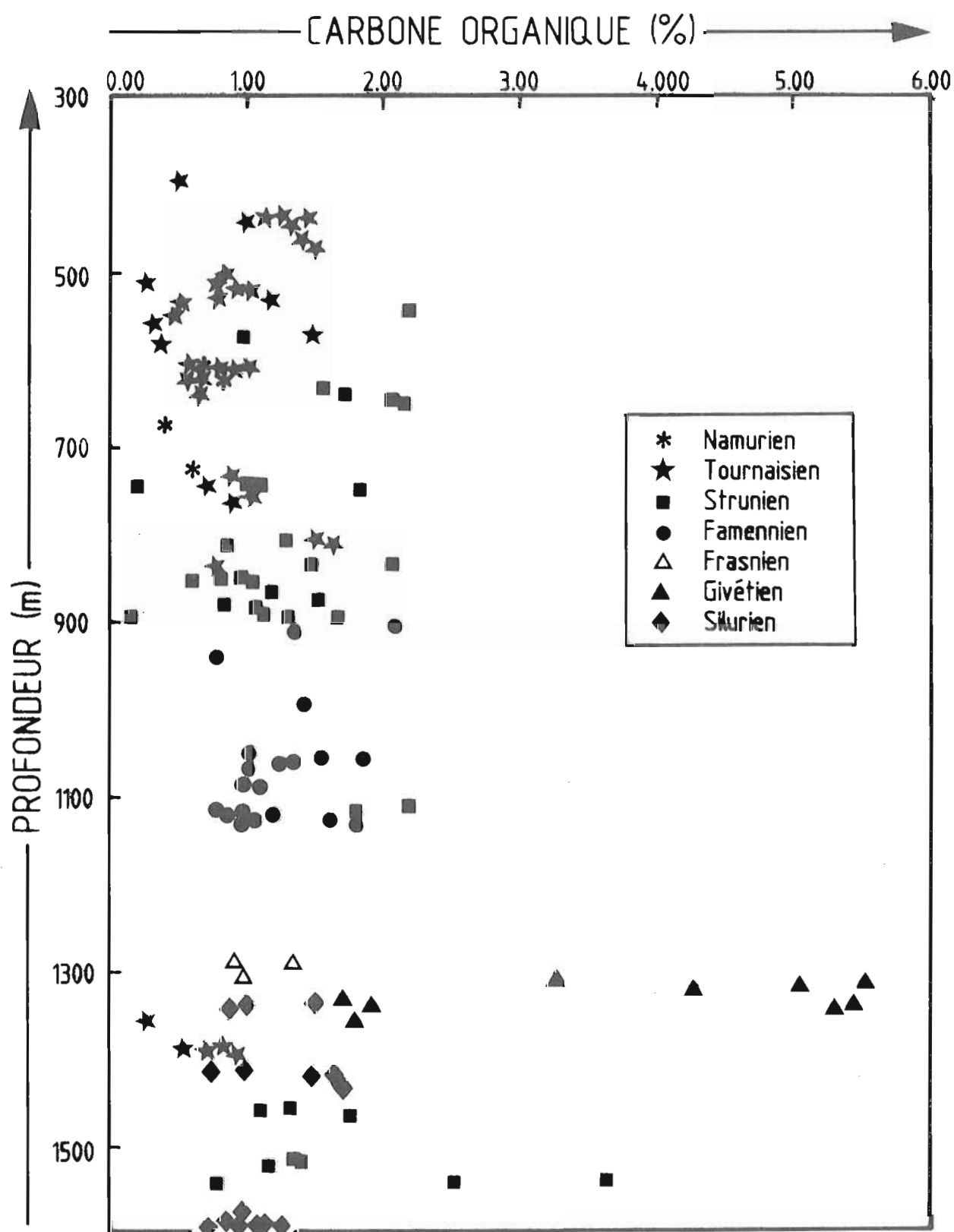


Fig. 20: Teneurs en carbone organique des sédiments bruts en fonction de la profondeur .

c) Strunien:

Les résultats des analyses de carbone organique effectuées sur 37 échantillons montrent qu'au niveau de cet étage, les teneurs présentent d'importantes variations qui ne sont pas systématiquement conformes aux faciès lithologiques correspondants: entre 0,17 et 3,68 % (tableaux 14, 17, 18, 19 et 23).

d) Famennien:

Les teneurs pondérales en carbone organique pour ce niveau dont 20 échantillons ont été analysés sont moyennes et varient de 0,80 à 2,09 % (tableaux 19 et 21).

e) Frasnien:

Au niveau de cet étage seuls 3 échantillons ont été analysés. Les teneurs en carbone organique varient entre 0,66 à 1,36 % (tableau 17).

f) Grévénien:

Les teneurs moyennes en carbone organique au niveau de cet étage sont conformes aux faciès lithologiques: les niveaux argileux présentent des teneurs de 5,5 % et les niveaux grés-carbonatés des teneurs de 1,70 % (tableaux 14 et 17). Ces teneurs indiquent la richesse en matière organique de cet étage.

g) Silurien:

Des teneurs en carbone organique moyennes et relativement constantes sont enregistrées pour cet étage stratigraphique: entre 0,75 et 1,68 % (tableaux 14, 17, 18 et 20).

En conclusion, les analyses du carbone organique dans les sédiments paléozoïques du bassin de Sbaa permettent de mettre en évidence les deux points suivants:

- 1- Les teneurs en carbone organique varient en général conformément au faciès lithologique;

2- Ces teneurs sont moyennes ($0,5 \% < C_{org.} < 2 \%$) pour toute la série stratigraphique, à l'exception du Givétien où l'on observe des niveaux riches en matière organique ($C_{org.} = 5,5 \%$).

• 11-2-1-2- Pyrolyse Rock-Eval

a) Commentaire des résultats bruts

Comme il a été signalé dans le paragraphe A-11-1-2 ci-dessus, la pyrolyse de la roche brute par la méthode Rock-Eval a été effectuée systématiquement sur tous les échantillons. Les valeurs des différents paramètres mesurés et calculés (S1, S2, S3, IP, Tmax, IH, IO) sont données dans les tableaux 14 à 23 de l'annexe III et les évolutions de IH, IO et Tmax en fonction de la profondeur représentées dans les figures 21 à 23.

Ces résultats appellent les observations suivantes:

i) Les composés hydrocarbonés présents à l'état libre dans la roche (dont les quantités sont données par la surface S1 du pic P1) ne représentent qu'une faible quantité comparée à la matière organique pyrolysable (correspondant aux effluents hydrocarbonés dégagés par pyrolyse, pic P2). Néanmoins, deux niveaux se distinguent:

* les argiles du Givétien où les quantités sont en général importantes (entre 0,66 et 1,50 mg d'HC / g de roche; voir tableaux 14 et 17);

* la base du Tournaisien, au niveau des "Grès de Sbaa", où la valeur de S1 atteint 2,15 mg d'HC / g de roche dans le sondage Sbaa-1 (tableau 14). On sait par ailleurs que cette formation est un niveau réservoir (voir Introduction).

ii) Les quantités de composés hydrocarbonés "potentiels" (dont les quantités sont données par la surface S2 du pic P2) présentent de grandes variations liées en général au faciès lithologique du sédiment: les faciès argileux ont les plus fortes valeurs de S2 et les faciès gréseux les plus faibles. Toutefois, et indépendamment de la nature lithologique, c'est au niveau du Tournaisien que nous enregistrons en général les plus faibles valeurs de S2 (tableaux 14, 15, 16, 17, 18 et 23). Les argiles du Givétien

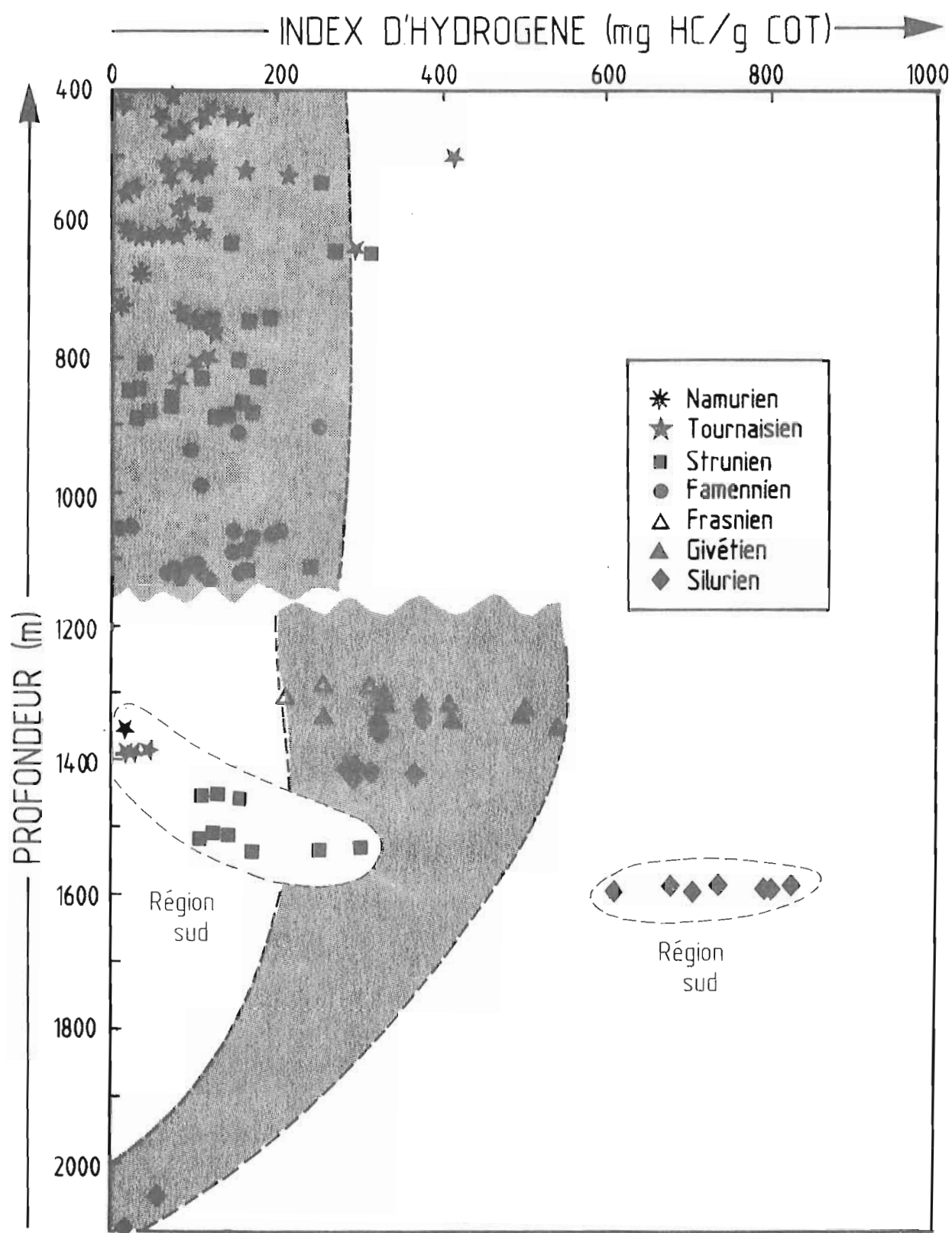


Fig. 21 : Evolution de l'index d'hydrogène des sédiments bruts en fonction de la profondeur .

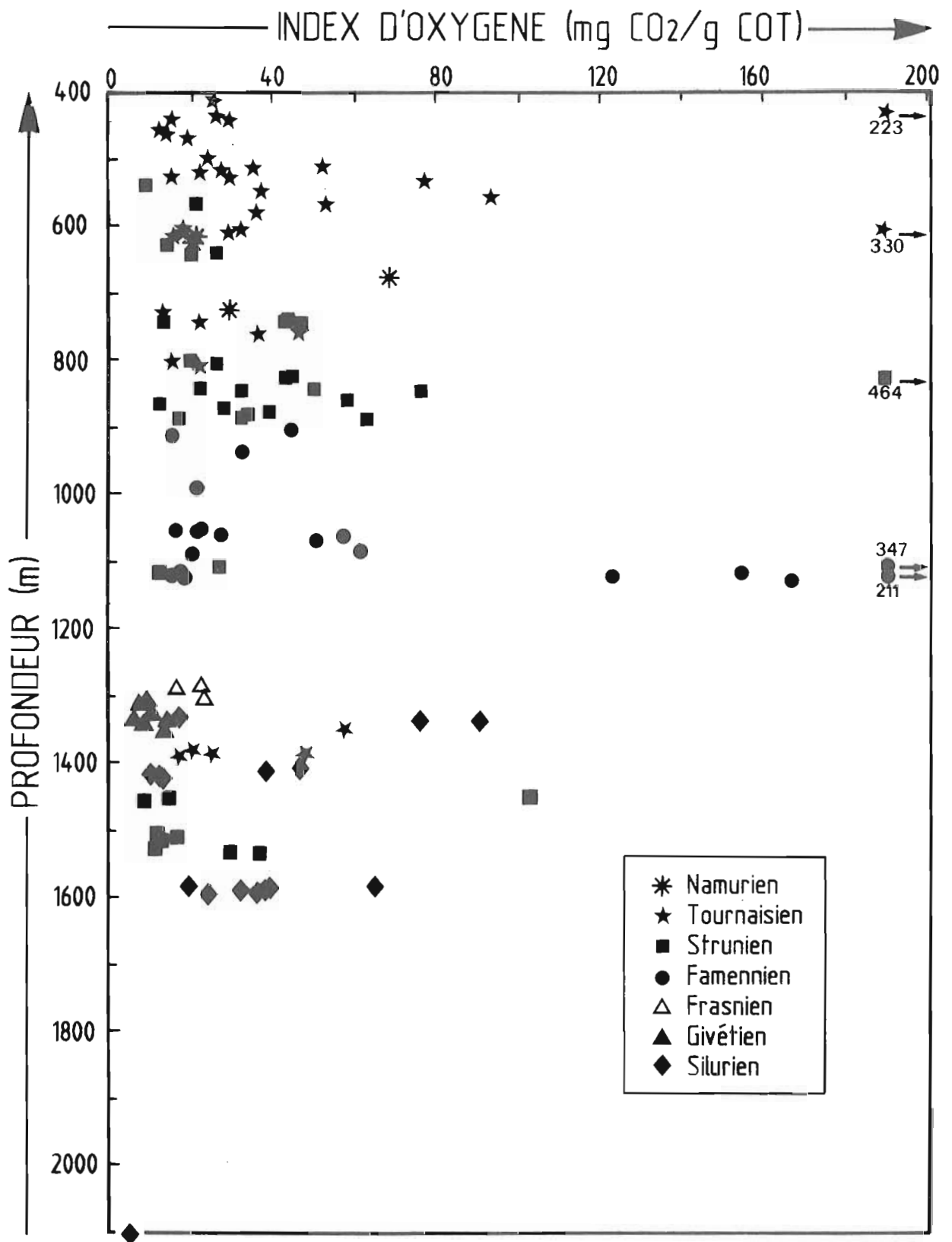


Fig. 22 : Index d'oxygène des sédiments bruts en fonction de la profondeur .

présentent par contre les plus grandes quantités de composés hydrocarbonés "potentiels" pouvant atteindre 22 mg d'HC / g de roche (tableaux 14 et 17). Des valeurs intermédiaires ($S_2 = 5$ mg d'HC / g de roche en moyenne) se retrouvent au niveau du Silurien (tableaux 14, 17, 18 et 20).

Comme nous l'avons vu précédemment (paragraphe A-II-4-3-2), les composés hydrocarbonés constituant le pic P2 résultent en grande partie du craquage du kérogène et des composés extractibles lourds (résines et asphaltènes) non thermovaporisables. Ils représentent, en première approximation, la quantité totale d'hydrocarbures qui seraient susceptibles d'être libérés par le kérogène au cours de son évolution thermique naturelle.

Le pic P2 est donc appelé "potentiel pétrolier" ou "potentiel génétique" de la roche (Espitalié et al., 1985).

Nous remarquons que dans le cas des sédiments paléozoïques étudiés, ce sont ceux du Givétien qui présentent les valeurs de "potentiel pétrolier" les plus fortes, allant de 3 à 22 mg d'HC / g de roche (tableaux 14 et 17). Notons que le degré d'évolution de ces sédiments les situent dans la fenêtre à huile; ils sont donc susceptibles d'avoir déjà produit des hydrocarbures, sujets à une éventuelle migration comme nous le verrons plus loin. Il s'agirait donc de "potentiel pétrolier résiduel". Les résultats concernant le potentiel pétrolier de la matière organique, c'est à dire son type défini par l'index d'hydrogène, sont exposés dans le paragraphe b) ci-dessous.

iii) Les quantités de composés oxygénés (données par la surface S3 du pic P3) varient en général en sens inverse des quantités de composés hydrocarbonés "potentiels" (figures 21 et 22). Les plus fortes teneurs sont enregistrées dans les niveaux gréseux du Tournaisien et du Strunien où elles peuvent atteindre 4 mg de CO₂ / g de roche (tableaux 14 à 19); par contre, au niveau des argiles du Givétien et du Silurien, ces teneurs sont faibles et ne dépassent pas 0,8 mg de CO₂ / g de roche (tableaux 14, 17 et 20).

iv) Enfin, les températures mesurées au sommet du pic S2 (T_{max}) présentent de grandes variations au niveau des sédiments du Tournaisien, Strunien et Famennien. Nous constatons néanmoins que ces valeurs sont généralement comprises entre 415 et 440°C (tableaux 14 à 23). Par contre, les températures enregistrées au cours de la pyrolyse des sédiments du Givétien et du Silurien paraissent relativement moins dispersées et varient entre 436 et 455°C (tableaux 14, 17, 18 et 20).

Notons que les valeurs de T_{max} peuvent, dans le cas des sédiments bruts, être affectées par la nature et l'abondance de la matrice minérale (Espitalié et al., 1985).

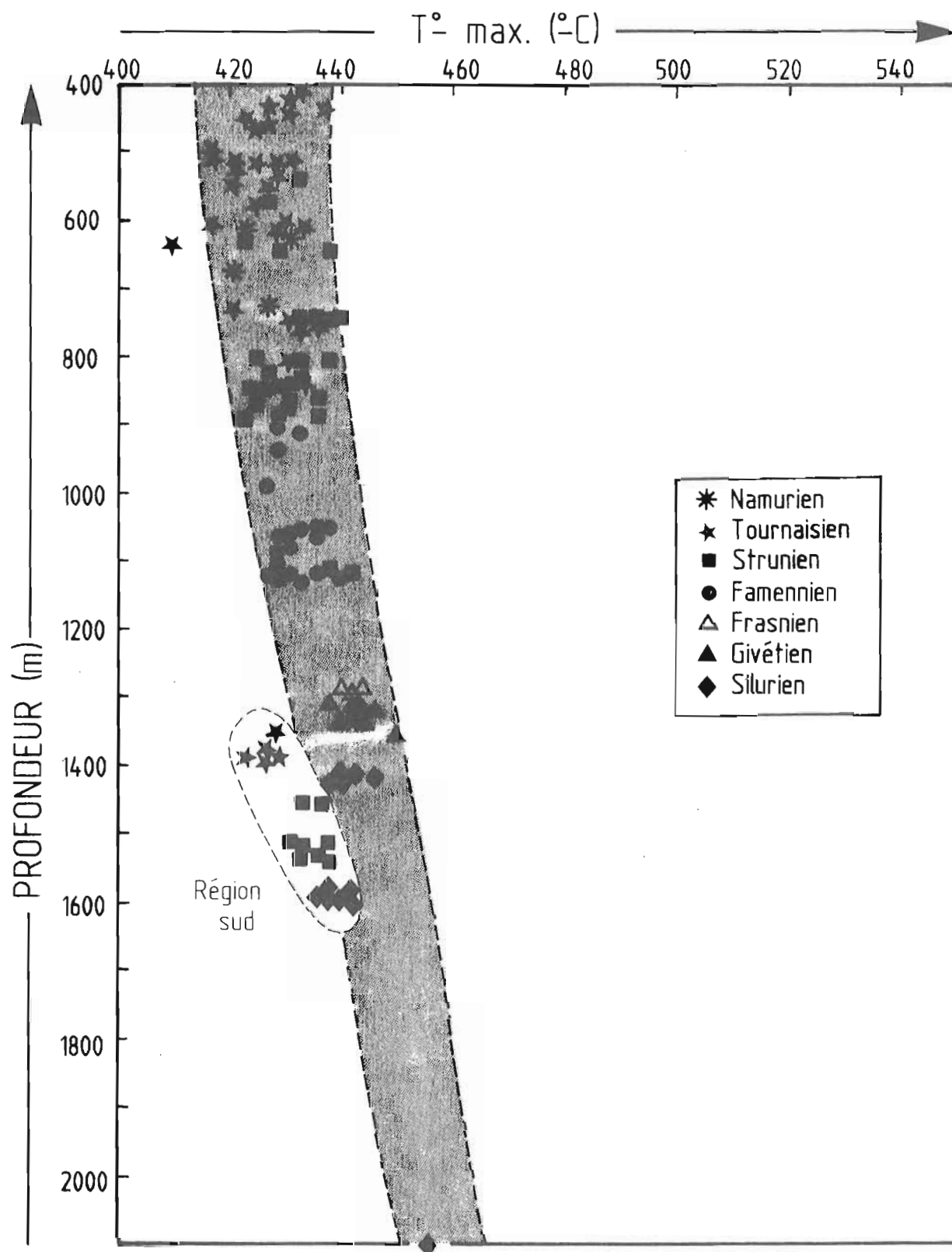


Fig. 23 : Evolution du $T^{\circ} \text{ max}$ des sédiments bruts en fonction de la profondeur .

b) Diagrammes IH/I0 et IH/Tmax

La pyrolyse Rock-Eval, comme nous l'avons signalé précédemment, permet d'approcher l'évolution de la matière organique au cours de son enfouissement et de déterminer son potentiel pétrolier et son degré d'évolution. Ainsi, nous avons calculé, à partir des quantités des deux fractions libérées (S2 et S3) et du pourcentage pondéral de carbone organique total des échantillons, les index d'hydrogène IH (quantités de composés hydrocarbonés "potentiels" libérés, rapportées au carbone organique) et les index d'oxygène (quantités de CO2 libéré rapportée au carbone organique).

Ces index sont reportés dans un diagramme IH-I0 qui est comparable au diagramme H/C-O/C de Van Krevelen (Espitalié et al. 1977).

Le diagramme IH-I0 permet de reconnaître le type de la matière organique étudiée, et de définir ainsi son potentiel pétrolier, tandis que le diagramme IH-Tmax (Tmax = température atteinte au sommet du pic S2) permet de définir à la fois le type de matière organique et son degré de maturation.

Les positions des points représentatifs des sédiments bruts paléozoïques du bassin de Sbaa sont portées dans les figures 24 à 29 pour les diagrammes IH-I0 et 30 à 35 pour les diagrammes IH-Tmax.

L'examen des diagrammes IH-I0 conduit aux constatations générales suivantes:

i) Les points représentatifs des sédiments du Tournaisien, du Strunien et du Famennien se placent à proximité ou sur la lignée III (figures 24 à 26) et sont caractérisés par la valeur élevée de leur index d'oxygène (figure 22). La variabilité et l'importance des index d'oxygène dans ces sédiments semblent témoigner, soit de l'action de processus d'altération ayant affecté la matière organique, soit de la nature détritique et continentale de cette matière organique, soit des deux à la fois.

ii) Les points représentatifs des sédiments du Frasnien, du Givétien et du Silurien se regroupent par contre autour de la lignée II et sont caractérisés par la valeur relativement élevée de leur index d'hydrogène (figures 27 à 29). Nous remarquons néanmoins, que certains échantillons du sommet du Silurien présentent des index d'oxygène plus élevés; ces valeurs croissent au fur et à mesure qu'on s'approche du toit de cette formation (tableau 14). Or, à ce niveau, il apparaît (voir paragraphe II-2 de la Première partie) une lacune de sédimentation ou une érosion du Dévonien inférieur et de la base du Dévonien moyen: le Givétien repose directement sur le Silurien. Ces valeurs élevées de l'index d'oxygène pourraient donc s'expliquer par une altération de la matière organique suite à une éventuelle émersion.

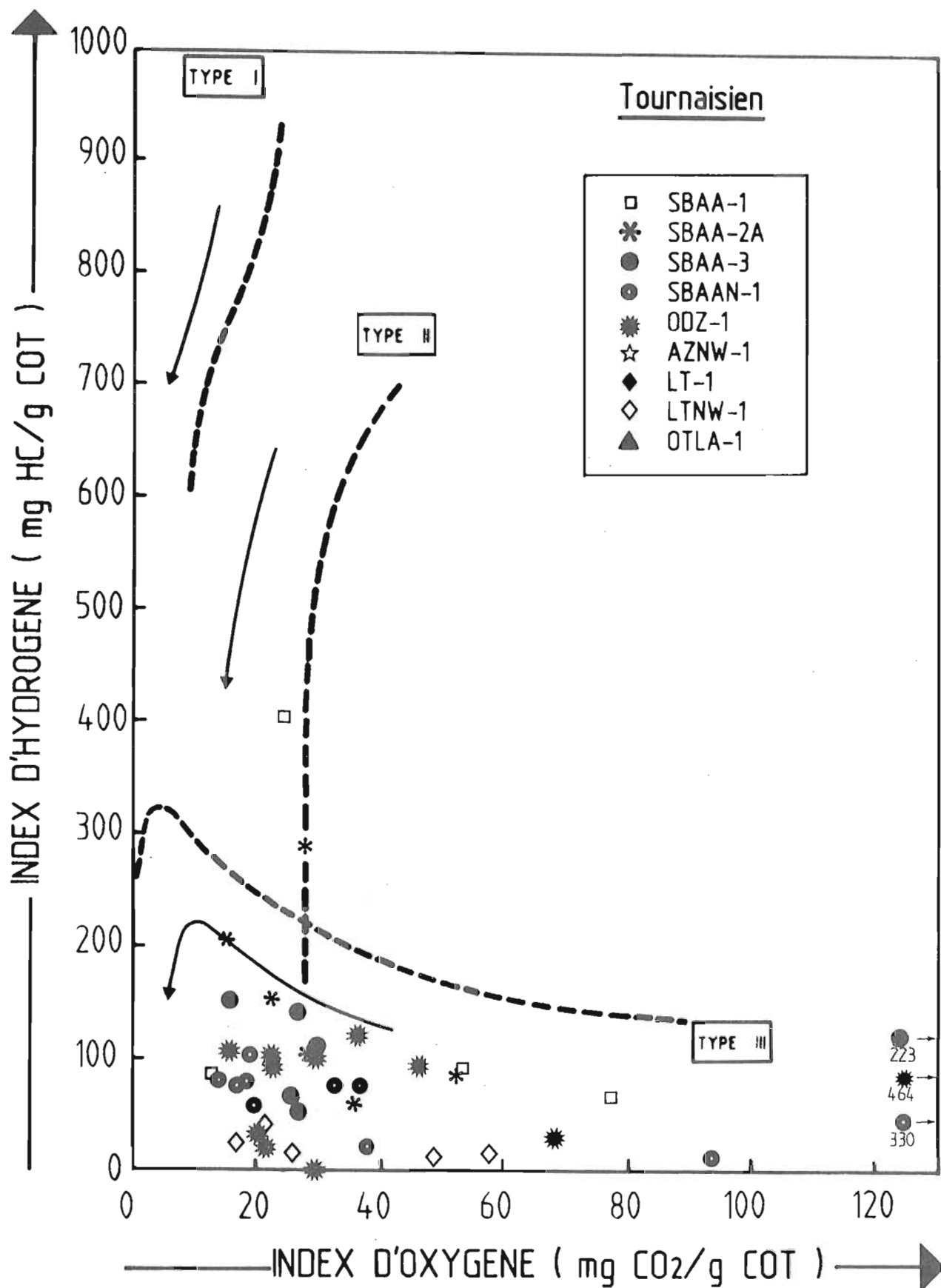


Figure 24 : Position des échantillons de roche brute du Tournaisien dans un diagramme IH-IO .

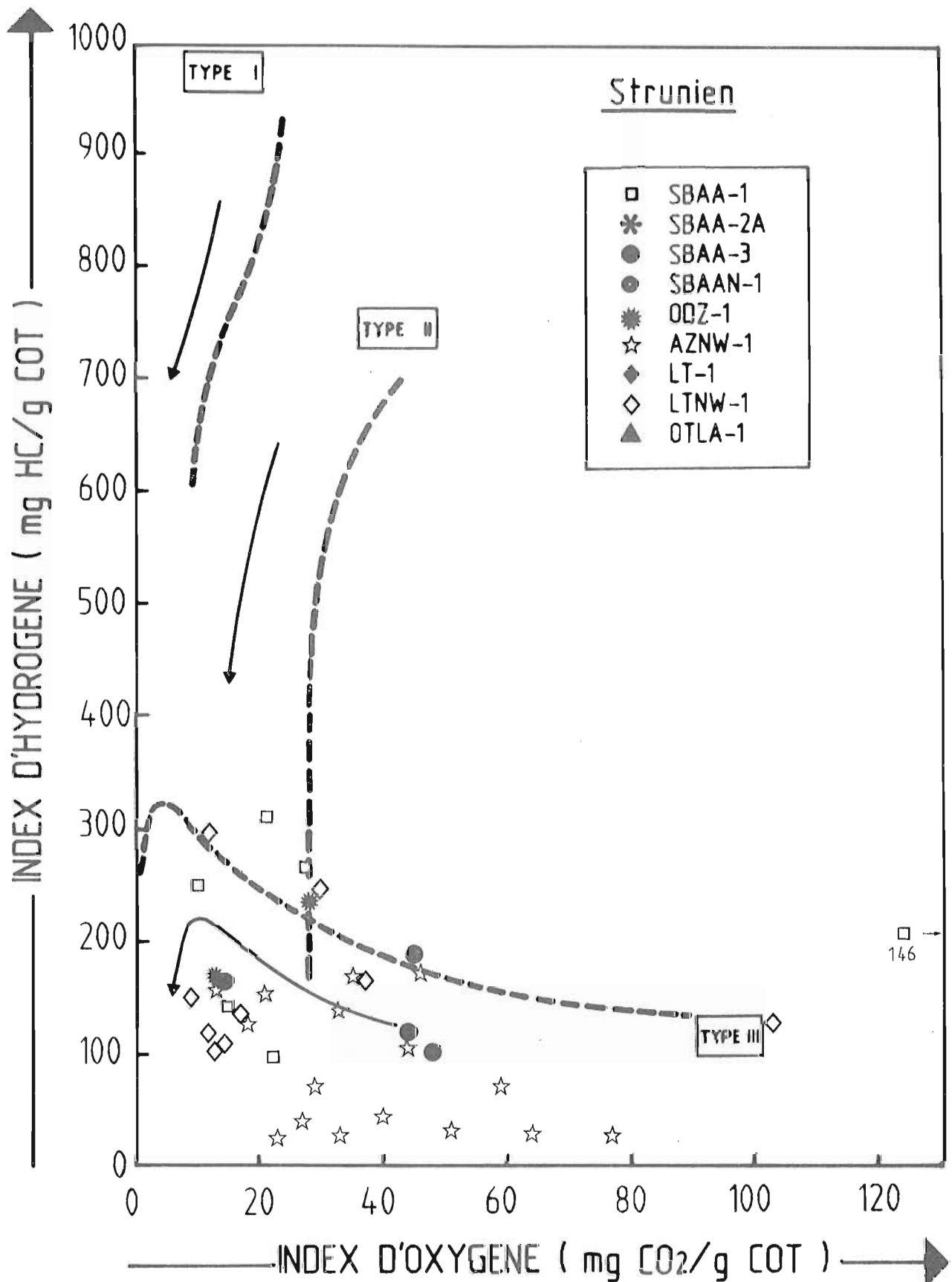


Figure 25 : Position des échantillons de roche brute du Strunien dans un diagramme IH-IO .

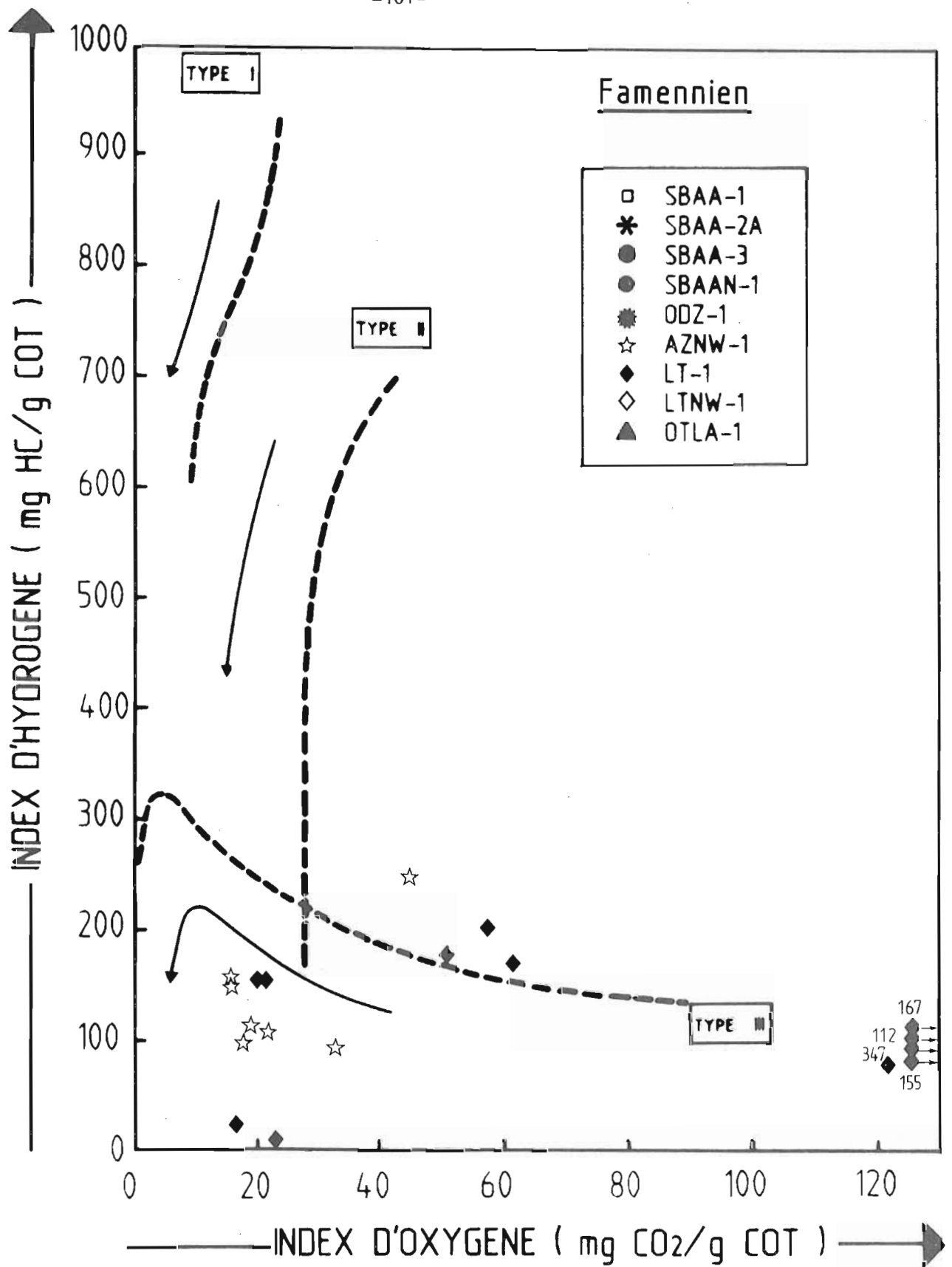


Figure 26 : Position des échantillons de roche brute du Famennien dans un diagramme IH-IO .

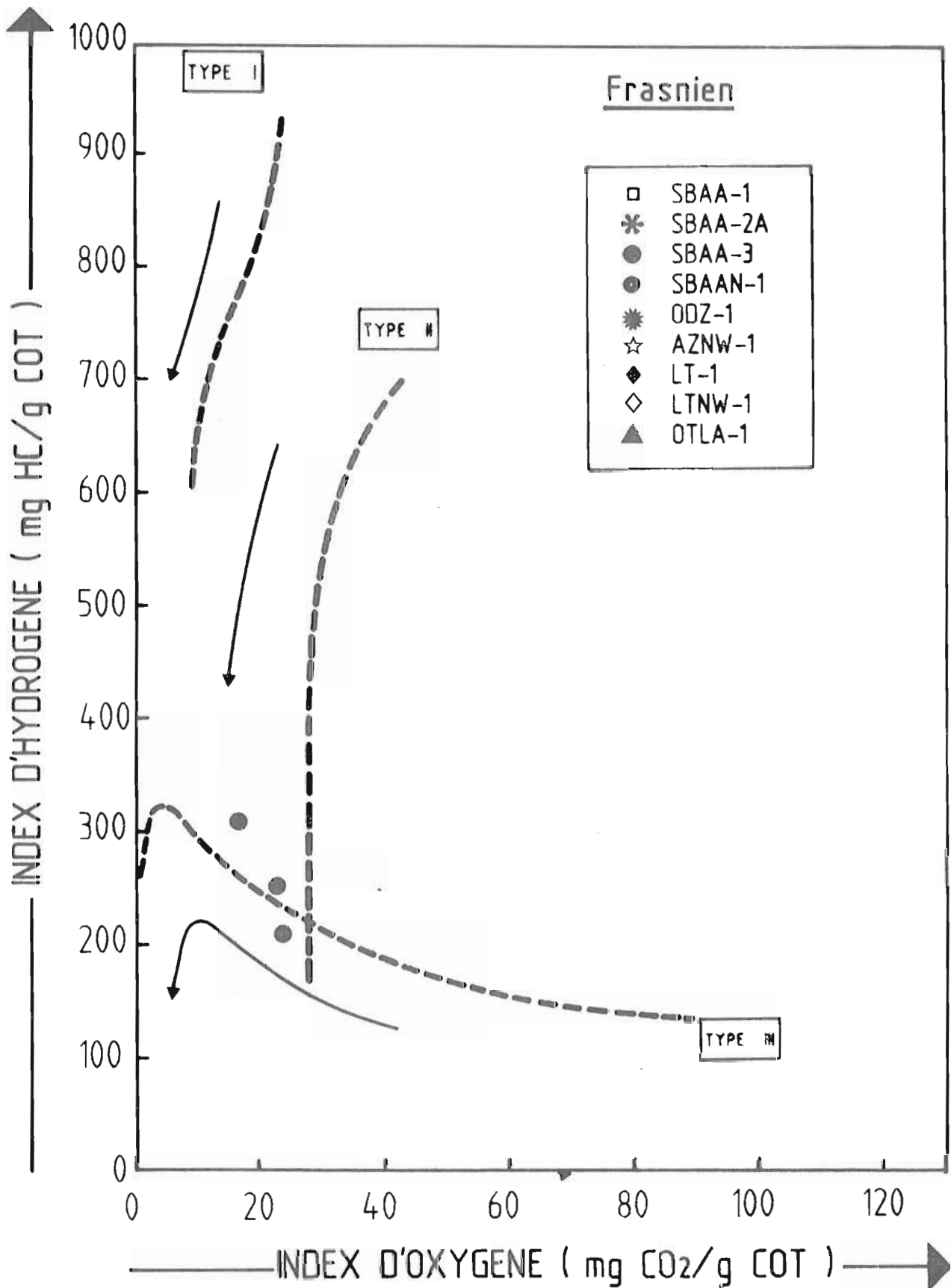


Figure 27 : Position des échantillons de roche brute du Frasnien dans un diagramme IH-IO .

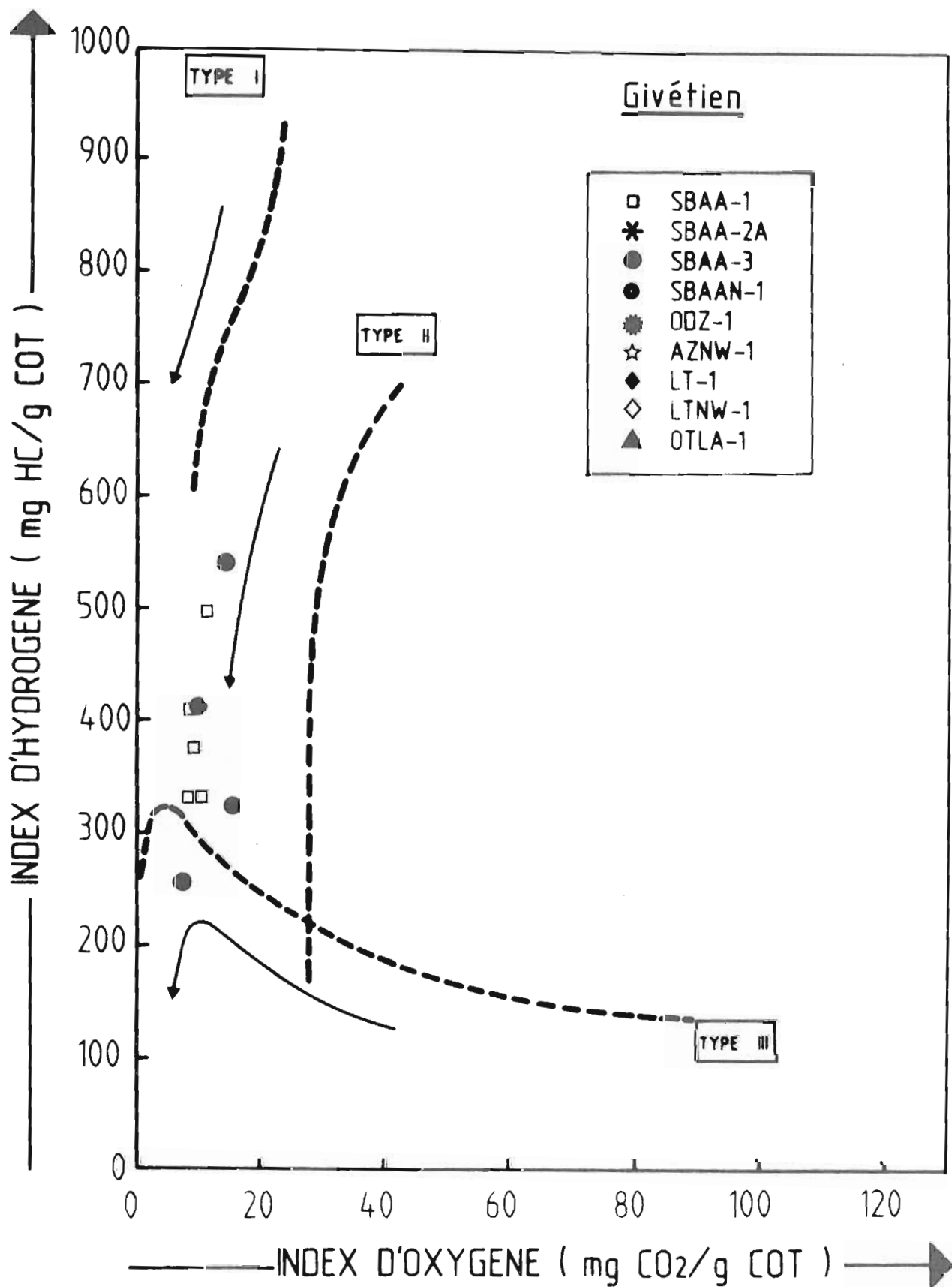


Figure 28 : Position des échantillons de roche brute du Givétien dans un diagramme IH-IO .

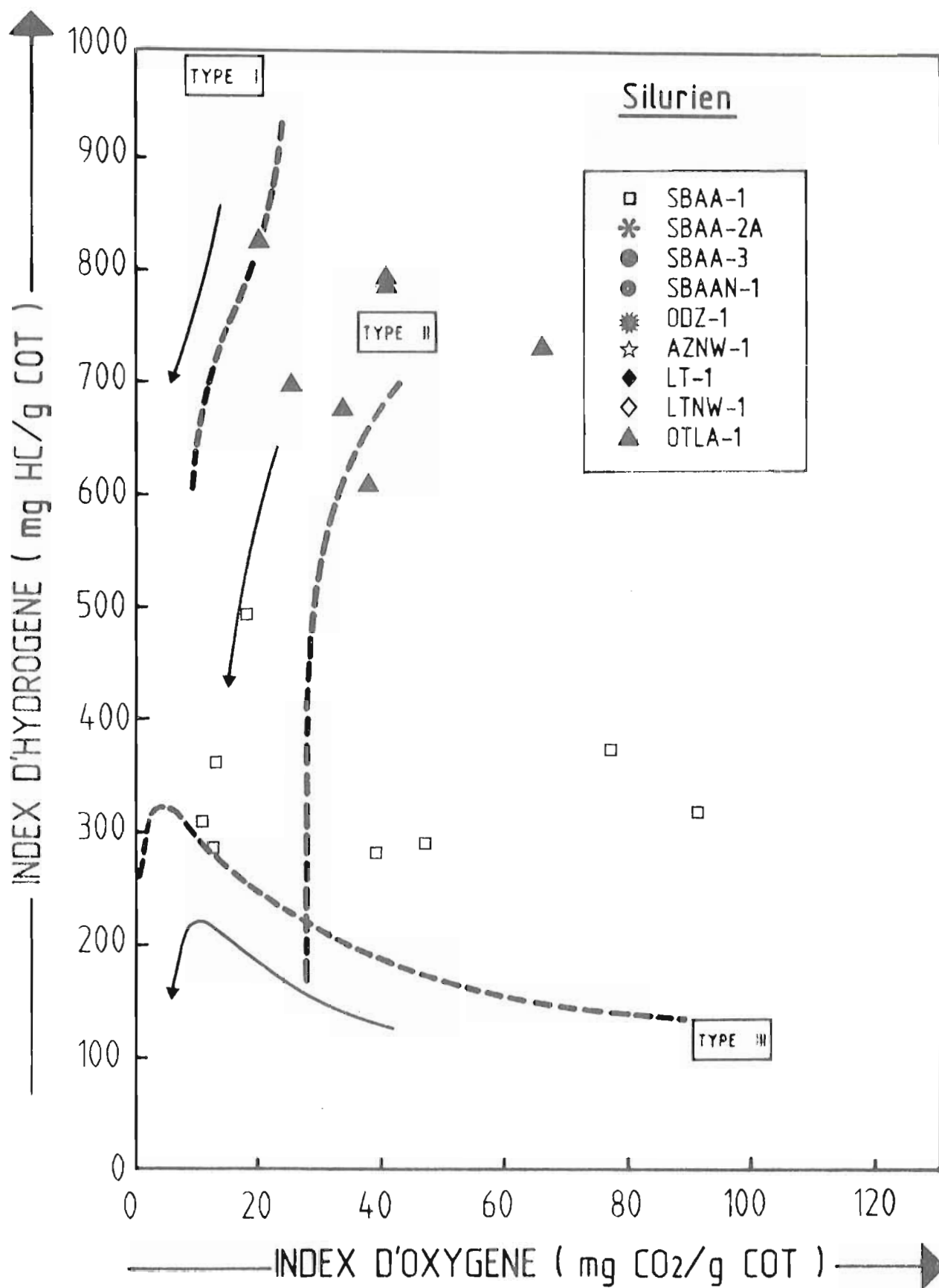


Figure 29 : Position des échantillons de roche brute du Silurien dans un diagramme IH-IO .

iii) Comme le montre la figure 21, le potentiel pétrolier de la matière organique du Tournaisien, du Strunien et du Famennien est relativement faible: il atteint, pour les échantillons les plus riches, 250 mg d'HC / g COT.

Par contre, le Frasnien, le Givétien et surtout le Silurien de la région sud (sondage OTLA-1) présente un potentiel pétrolier très élevé pouvant atteindre 800 mg d'HC / g de COT.

Les diagrammes établis à partir des valeurs de l'index d'hydrogène (IH) et du Tmax de pyrolyse font l'objet des figures 30 à 35. Dans ces diagrammes, les matières organiques pures (kérogènes et charbons), ainsi que les matières organiques dispersées dans les roches (quand elles ne subissent pas d'effet de matrice minérale important), sont localisées à l'intérieur de "bandes" caractéristiques de chaque type de kérogène (Espitalié et al., 1985).

Ces diagrammes appellent les remarques suivantes:

i) Les points représentatifs des échantillons du Tournaisien, du Strunien et du Famennien se situent tous en dessous de 440°C (entre 415 et 440°C). Ces points sont relativement dispersés et une grande partie d'entre eux se trouve en dessous de la "bande" caractéristique du type III. Cette répartition peut résulter, soit de la composition originelle de la matière organique elle-même (matière organique altérée ou mélange de matière organique), soit d'un effet dû à la matrice minérale. En effet, la pyrolyse Rock-Eval effectuée sur une partie de ces mêmes échantillons après destruction de la matrice minérale nous montre une translation parallèle à l'axe des ordonnées vers des valeurs plus élevées d'index d'hydrogène (figure 42 et paragraphe II-2-2-2 ci-dessous).

ii) Les points représentatifs des sédiments du Frasnien, du Givétien et du Silurien se situent à des températures comprises entre 440 et 455°C. Comme la matière organique de ces sédiments appartient au type II (figures 27 à 29), elle se trouve en phase principale de génération d'huile.

Néanmoins, l'étude pétrologique (paragraphe II-1-1) montre que la matière organique du Silurien de la région sud est relativement immature. Ceci est en contradiction avec les valeurs du Tmax de pyrolyse (figure 35): aucune distinction ne peut en effet être faite du point de vue de la maturation, entre la matière organique du Silurien de la région sud et celle de la région nord. Par contre, les valeurs du IH de la matière organique du Silurien de la région sud (figure 35) montrent son très fort potentiel pétrolier (700 mg d'HC / g de COT) par rapport à celle de la région nord; celle-ci aurait donc déjà généré des hydrocarbures et son potentiel pétrolier "résiduel" n'est plus que de 350 mg d'HC / g de COT en moyenne (figure 21).

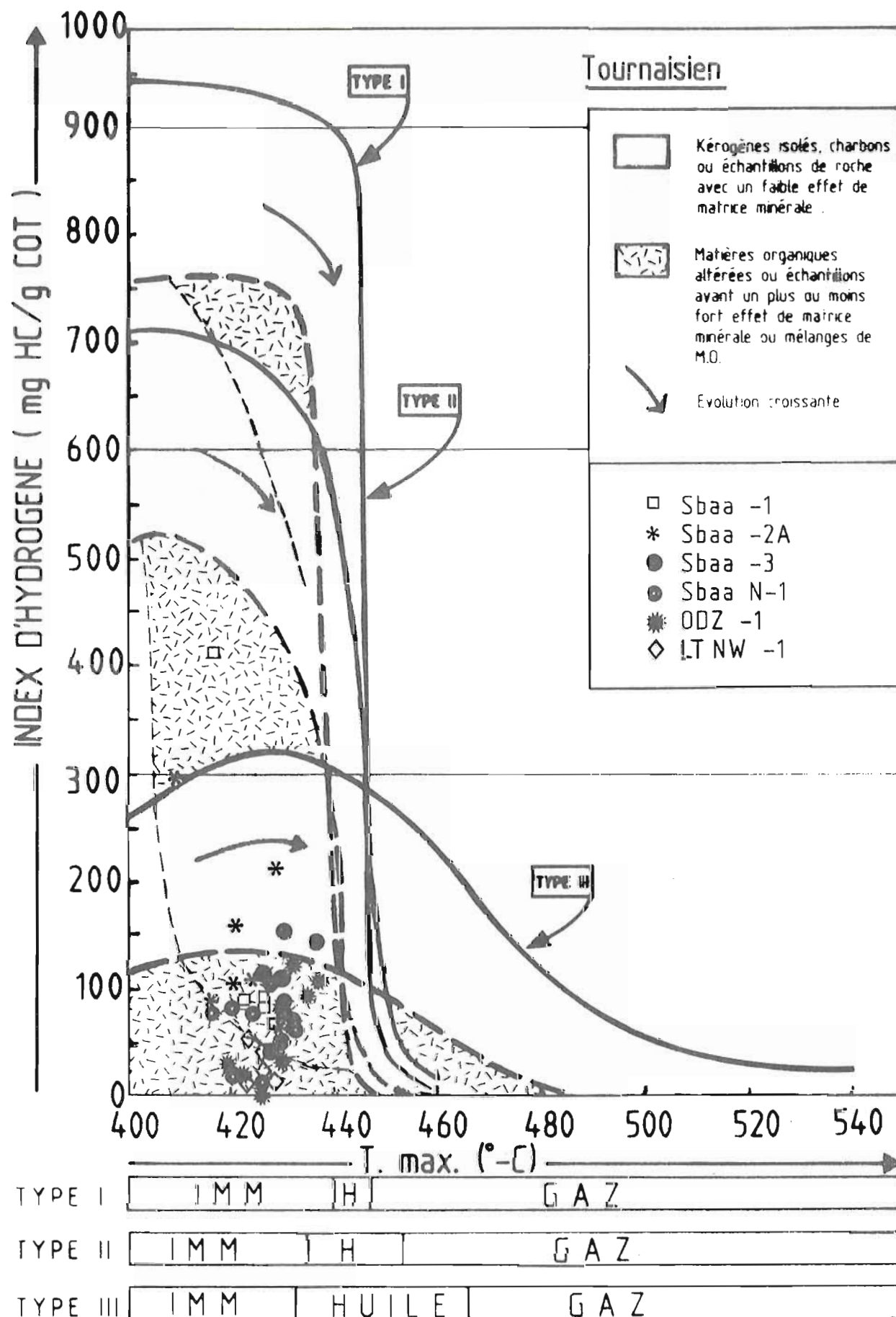


Figure 30 : Position des échantillons de roche brute du Tournaisien dans un diagramme IH-T.max.

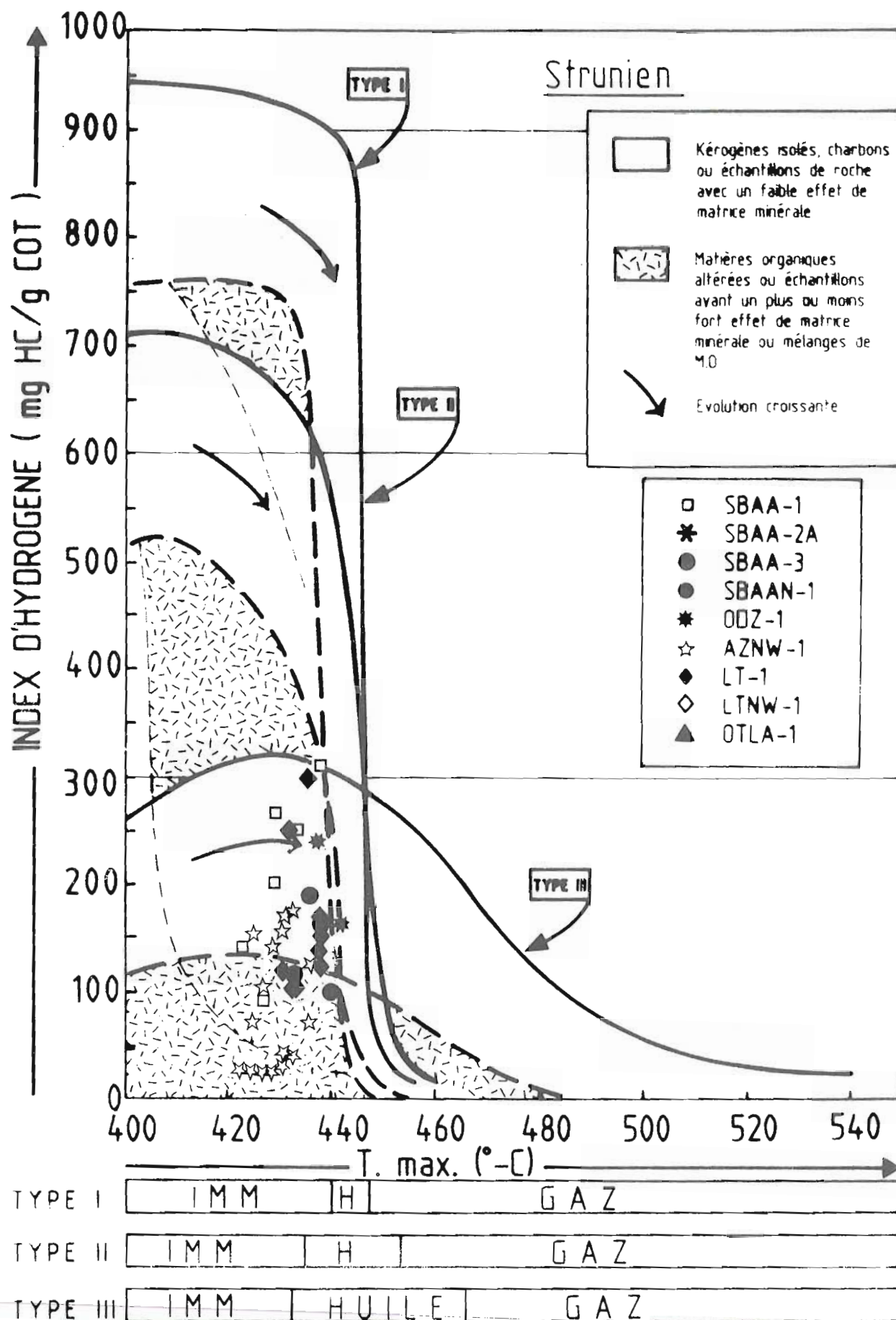


Figure 31 : Position des échantillons de roche brute du Strunien dans un diagramme IH-T.max.

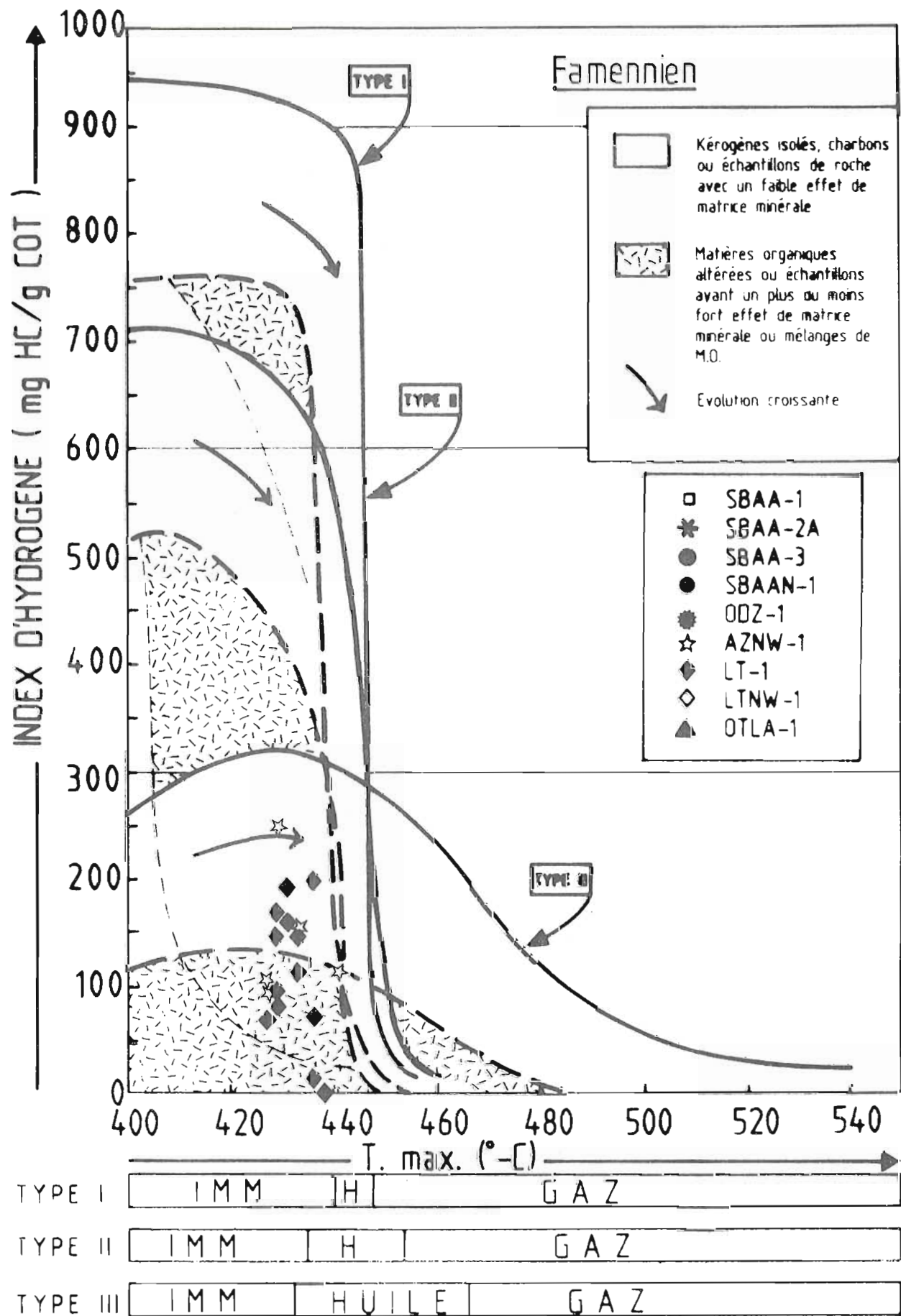


Figure 32 : Position des échantillons de roche brute du Famennien dans un diagramme IH-T.max.

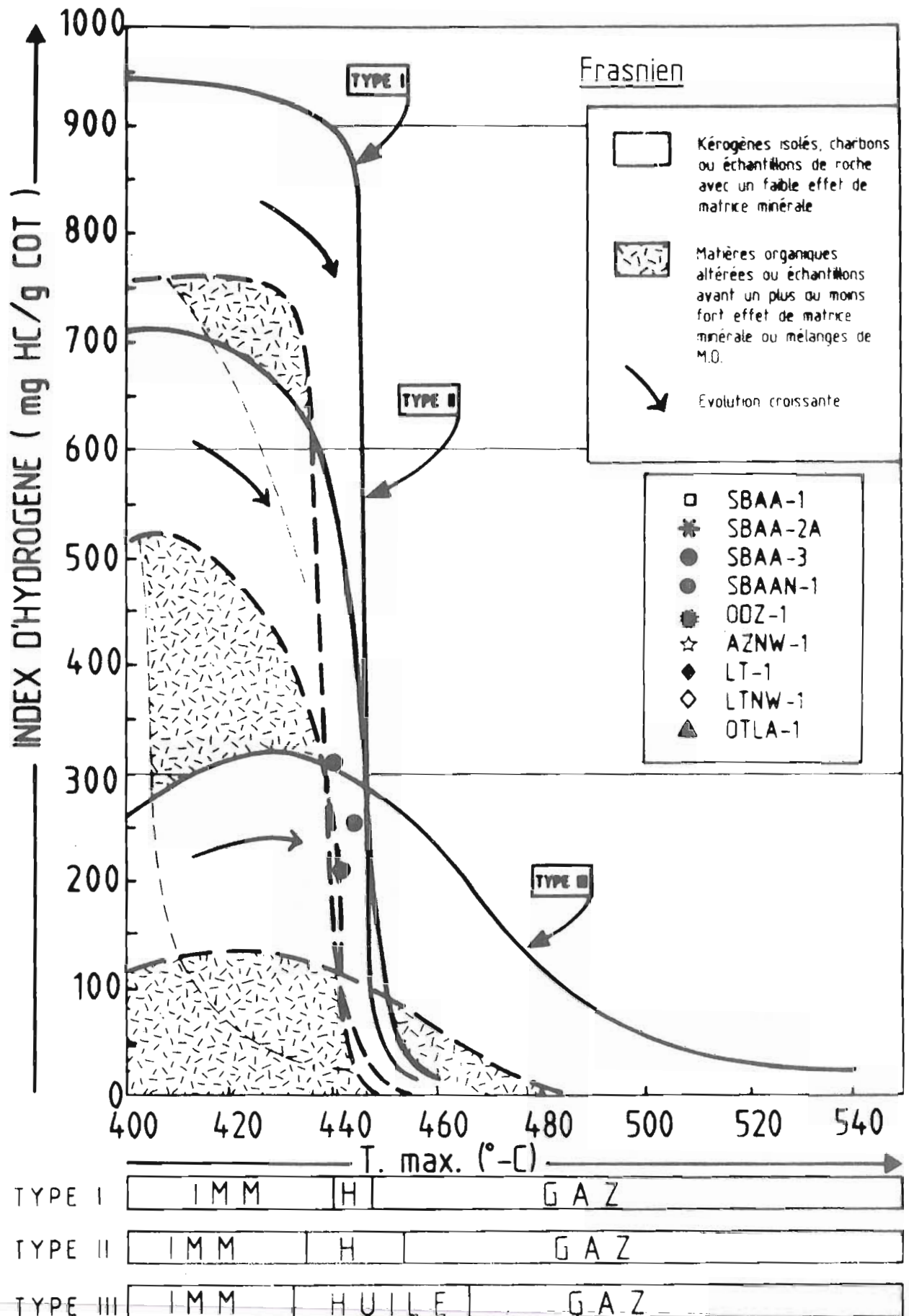


Figure 33 : Position des échantillons de roche brute du Fasnien dans un diagramme IH-T.max.

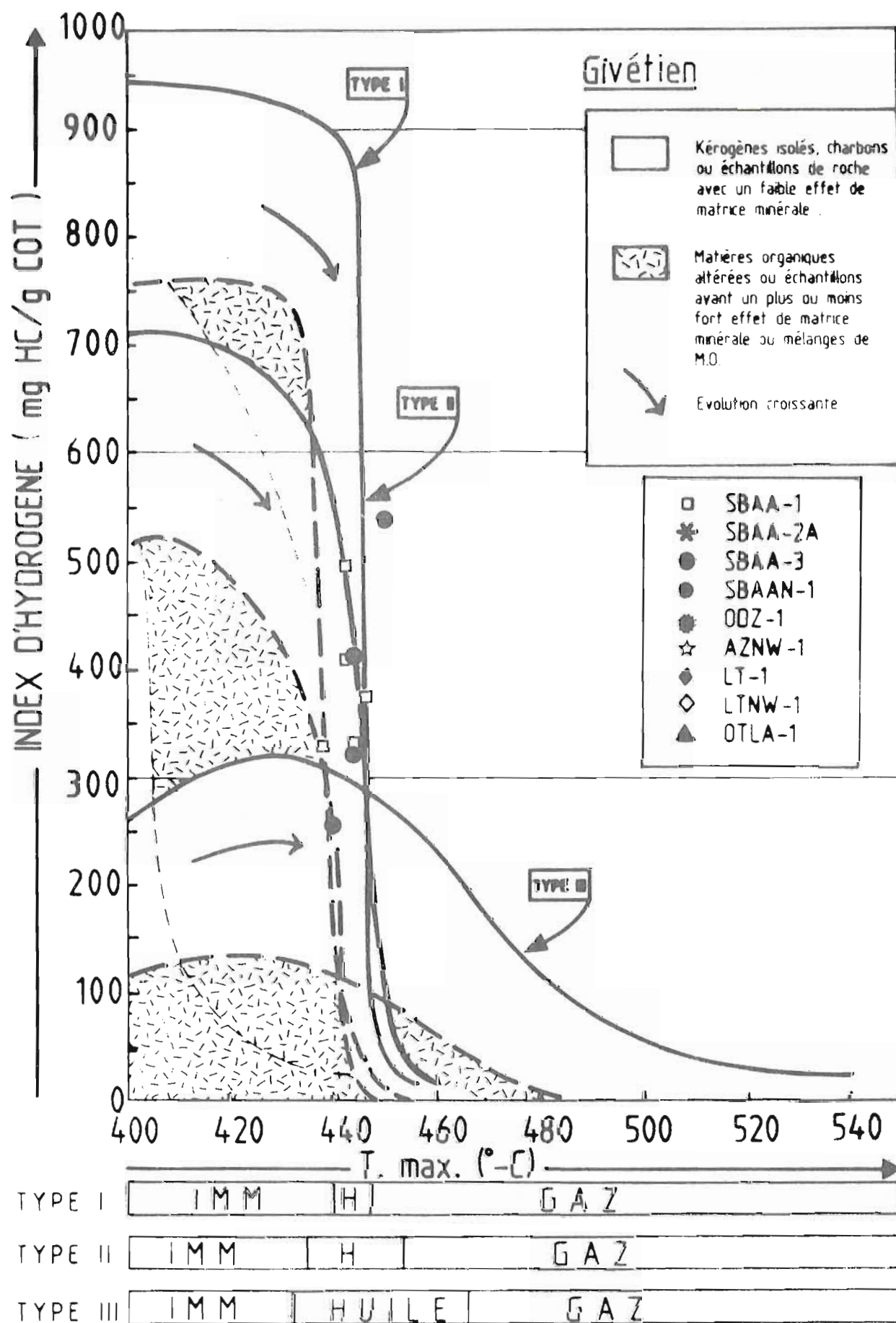


Figure 34 : Position des échantillons de roche brute du Givétien dans un diagramme IH-T.max.

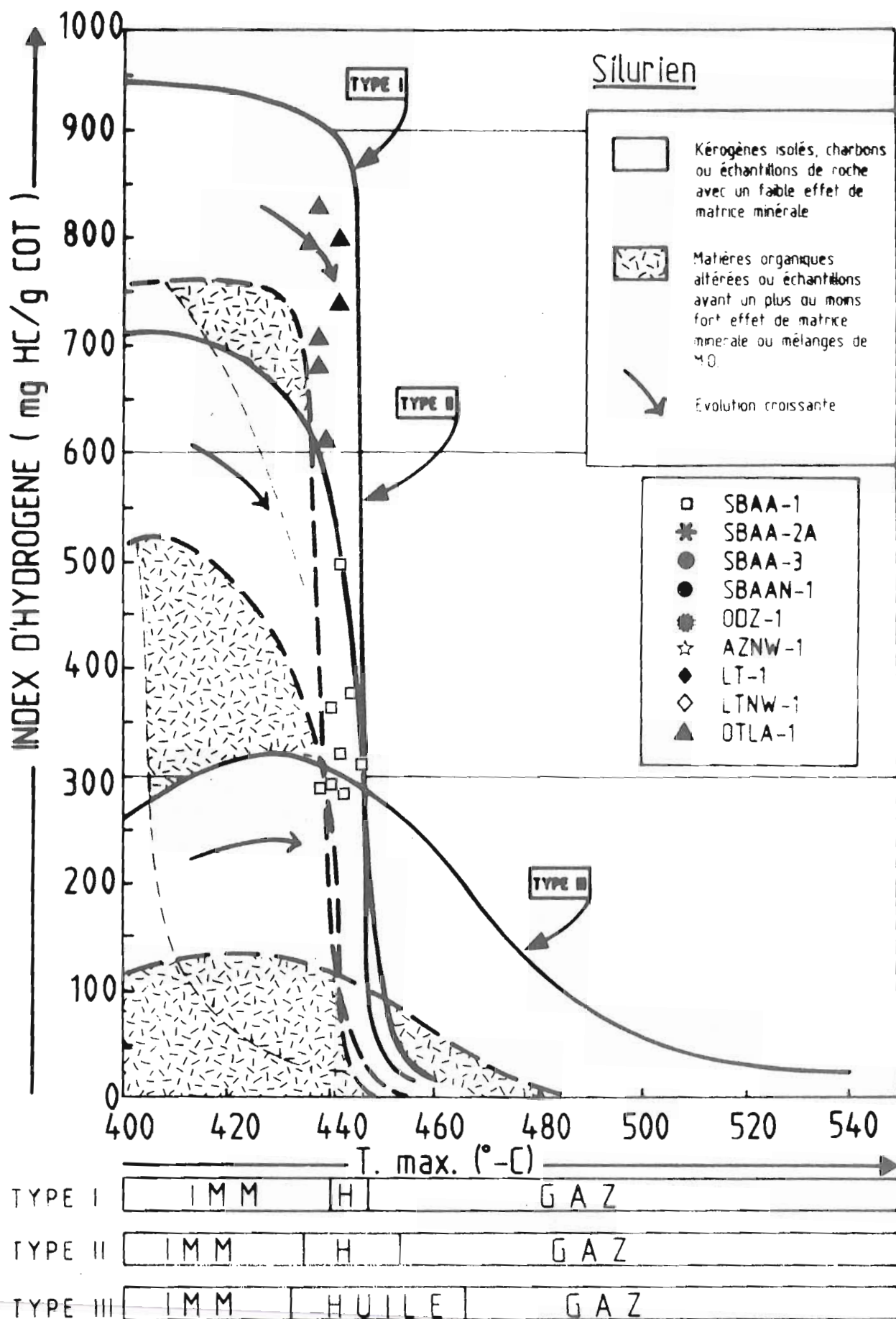


Figure 35 : Position des échantillons de roche brute du Silurien dans un diagramme IH-T.max.

11-2-2- Etude des kérogènes

Rappelons que le kérogène désigne la fraction des constituants organiques des roches insoluble dans les solvants organiques (Durand, 1980). Du point de vue chimique, il est composé de structures aromatiques polynucléaires substituées latéralement par des chaînons ou des cycles aliphatiques (Espitalié et al., 1973). Il peut renfermer en outre des lipides non extractibles (Perrodon, 1985).

• 11-2-2-1- Composition  l mentaire

Rappelons que l'analyse élémentaire (C,H,O,N et S) du kérogène a été faite sur le KC de 23 échantillons représentatifs des différents niveaux lithostratigraphiques rencontrés dans le bassin de Sbaa et s'étant révélés riches en matière organique au vu des observations et des analyses précédentes. Les résultats sont regroupés dans le tableau 3 .

Les résultats de certains échantillons ne seront interprétés et utilisés qu'avec prudence, en raison des fortes teneurs en soufre et en cendres qu'ils mettent en évidence (Durand et Monin, 1980); les mêmes échantillons ont été reconnus riches en pyrite par la diffractométrie des rayons X (voir paragraphe 11-2 de la Deuxième partie). En effet, il a été constaté que les analyses élémentaires ne sont généralement valables que si les teneurs en Fe ne dépassent 18 %, ce qui correspond à une quantité de pyrite de 40 % (Durand, 1980). Par ailleurs, la méthode d'estimation des teneurs en S organique à partir des teneurs en S total et en Fe (indiquée dans le paragraphe A-11-4-3-1 ci-dessus) est basée sur l'hypothèse que tout le Fe est engagé dans la pyrite, ce dont nous ne sommes pas sûre.

Les teneurs en Fe sont très variables (tableau 3), entre 1,60 et 34 % suivant les échantillons. Les valeurs les plus faibles se retrouvent au niveau du Tournaisien, du Strunien et du Famennien (valeurs moyennes d'environ 8 %) alors que le Frasnien, le Givétien et le Silurien présentent des teneurs moyennes de 27 % environ.

Les teneurs corrigées des éléments organiques (C,H,O,N,S) sont portées dans le tableau 3 et, sous la forme de rapports atomiques H/C et O/C, dans la figure 36. Ces résultats appellent les commentaires suivants:

* les kérogènes extraits (KC) du Tournaisien, du Strunien et du Famennien se caractérisent par des rapports atomiques H/C relativement faibles (compris entre 0,07 et 0,90).

Les échantillons du Silurien et du Givétien possèdent les rapports H/C les plus élevés (0,90 à 1,40). Dans le cas du Silurien, ce rapport diminue parallèlement à l'enfouissement et donc à l'évolution diagénétique: de 1,39 au

N°	Sondage	Etage stratigraphique	Profondeur (m)	Analyse élémentaire brute							Valeurs calculées			Valeurs corrigées						Rapports atomiques			
				C	H	O	N	S	Fe	Cendres	Pyrite FeS ₂ %	S pyrite %	C	H	O	N	S	H/C	O/C	N/C	S/C		
16	SBA-1	Strunien	644,80	64,91	5,08	8,28	1,20	3,17	2,06	15,30	4,41	2,35	80,84	6,33	10,31	1,49	1,02	0,94	0,10	0,02	0,004		
18		Givétien	1312,80	29,11	2,22	0,97	4,26	33,43	28,35	1,66	60,75	32,40	76,30	5,82	11,17	2,54	4,17	0,92	0,11	0,03	0,02		
22		Silurien	1331,40	30,55	2,77	5,29	0,66	25,74	23,00	11,99	49,29	26,29	77,79	7,05	13,47	1,68	-	1,09	0,13	0,02	-		
29		Silurien	1417,60	13,63	1,41	3,90	0,36	39,60	33,94	7,16	72,73	38,79	67,78	7,01	19,39	1,79	4,03	1,24	0,21	0,02	0,02		
60	SBA-2	Tournaisien	438,80	48,27	3,07	7,35	0,87	17,76	15,95	6,73	34,18	18,23	81,04	5,15	12,34	1,46	-	0,76	0,11	0,02	-		
66		Strunien	744,50	62,04	4,02	5,83	0,92	4,63	3,92	18,64	8,40	4,48	85,03	5,51	7,79	1,26	0,21	0,78	0,07	0,01	0,001		
69		Frasnien	1289,80	19,37	1,73	3,55	0,47	39,25	33,71	1,92	72,24	38,53	74,96	6,70	13,74	1,82	2,79	1,07	0,14	0,02	0,01		
74		Givétien	1342,20	62,33	5,26	3,85	1,76	12,46	10,49	3,85	22,48	11,99	84,61	7,14	5,23	2,39	0,64	1,01	0,05	0,02	0,003		
76		Silurien	2049,00	21,67	1,28		0,49																
129	SBA-2A	Viséen/Tournaisien	522,20	27,68	1,64	5,01	0,52	27,04	24,03	14,08	51,49	27,46	69,44	4,11	12,57	1,30	-	0,71	0,14	0,02	-		
132	SBA-2A	Tournaisien	638,60	20,90	1,51	4,62	0,30	25,44															
139	SBA-1	Viséen/Tournaisien	614,00	22,28	1,45	4,98	0,43	28,32	8,62	33,92	18,47	9,85	46,80	3,05	10,46	0,90	38,79	0,78	0,17	0,01	0,31		
144	SBA-1	Tournaisien	734,70	22,39	1,24	4,42	0,34	25,76	24,86	20,99	53,27	28,41	78,87	4,37	15,57	1,20	-	0,66	0,15	0,01	-		
85	ODZ-1	Tournaisien	813,10	66,48	3,81	8,38	1,21	6,34	5,26	8,52	11,27	6,01	82,88	4,75	10,45	1,51	0,41	0,69	0,09	0,02	0,002		
87		Strunien	1110,50	68,07	4,66	6,99	1,16	2,34	1,59	15,19	3,41	1,82	83,62	5,72	8,59	1,43	0,64	0,82	0,08	0,01	0,003		
89		Silurien	2107,30	31,40	1,74	3,71	1,17	32,29	23,56	6,13	50,49	26,93	72,38	4,01	8,55	2,70	12,36	0,66	0,09	0,03	0,06		
41	AZNW-1	Strunien	867,75	48,49	3,18	8,21	0,82	12,73	2,18	24,39	4,67	2,49	68,35	4,48	11,57	1,16	14,43	0,79	0,13	0,01	0,08		
49		Famenien	905,40	61,83	4,33	8,44	1,29	4,68	3,53	15,90	7,56	4,03	80,78	5,66	11,03	1,69	0,85	0,84	0,10	0,02	0,004		
54		Famenien	1121,70	37,32	2,64	5,63	0,97	22,68	20,27	10,49	43,44	23,17	80,15	5,67	12,09	2,08	-	0,85	0,11	0,02	-		
94	OTLA-1	Silurien	1590,80	19,51	2,26	5,19	0,55	29,27	25,84	17,38	55,37	29,53	70,92	8,22	18,87	2,00	-	1,39	0,20	0,02	-		
105	LTNW-1	Strunien	1458,00	46,02	2,92	6,03	0,88	14,96	10,99	18,20	23,55	12,56	79,00	5,01	10,35	1,51	4,12	0,76	0,10	0,02	0,02		
109	LTNW-1	Strunien	1529,55	56,64	3,60	6,32	1,14	9,11	6,80	16,39	14,57	7,77	82,04	5,21	9,15	1,65	1,94	0,76	0,08	0,02	0,009		
116	LT-1	Famenien	1062,10	47,86	2,99	7,86	1,39	12,34	10,84	16,72	23,23	12,39	79,63	4,98	13,08	2,31	-	0,75	0,12	0,02	-		
149	LT-2	-	1427,60	55,98	3,48	7,69	1,13	3,28	2,37	26,07	5,08	2,71	81,31	5,05	11,17	1,64	0,83	0,75	0,10	0,02	0,004		

Tableau 3 : Résultats de l'analyse élémentaire et rapports atomiques des kérogènes extraits (KC).

sommet à 0,66 à la base. Notons toutefois que le Silurien étant particulièrement riche en pyrite (tableau 3), les résultats de l'analyse élémentaire des échantillons de cet étage sont à considérer avec prudence.

* les rapports atomiques O/C des kéroènes extraits (KC) sont très variables (compris entre 0,05 et 0,21) et aucune corrélation avec la lithologie ou l'évolution diagénétique n'apparaît. Notons toutefois que l'échantillon qui possède le rapport O/C le plus faible de ces étages (Givétien, n°74, 1342,20m, sondage Sbaa-3) est le seul qui ne renferme pas de grandes quantités de pyrite.

* dans un diagramme de Van Krevelen (1981) reporté dans la figure 36 (sur laquelle les échantillons n°29 et n°69, dont les teneurs en pyrite dépassent 70 %, n'ont pas été représentés), les points représentatifs des échantillons du Tournaisien, du Strunien et du Famennien se regroupent autour de la lignée III.

Les échantillons du Givétien et du Silurien occupent des positions variées: la plupart d'entre eux se situent entre les lignées II et III tandis que deux échantillons se positionnent dans la lignée II. Ces résultats ne sont pas conformes à ceux de la pyrolyse Rock-Eval (paragraphe B-II-2-1-2 et B-II-2-2-2) et de la pyrochromatographie (paragraphe B-II-2-2-4) ainsi qu'aux observations microscopiques (paragraphe B-II-1-1) qui indiquent tous sans ambiguïté une origine marine (lignée II) pour le matériel organique de ces étages. Ceci pourrait être expliqué par la présence de fortes teneurs en pyrite, puisque le seul échantillon de ces étages qui n'en contient pas plus de 40 % (n°74) appartient bien à la lignée II, dans une zone correspondant à la catagénèse (figure 36).

Par ailleurs, pour deux échantillons à forte teneur en pyrite (n°18, Givétien:60,75 %; n°29, Silurien: 72,73 %), nous avons également effectué l'analyse élémentaire des éléments organiques de leurs asphaltènes. Les rapports H/C et O/C de ceux-ci sont représentés, ainsi que ceux des KC correspondant dans un diagramme de Van Krevelen (figure 37).

En effet, de nombreux travaux ont montré que les asphaltènes, fraction la plus lourde des extraits de roche et des huiles, ont une structure proche de celle des kéroènes (Béhar et Vandenbroucke, 1986; Castex, 1985), et que, du fait de cette similitude de composition chimique, leurs évolutions sous l'influence de l'augmentation de température accompagnant l'enfouissement sont parallèles (Pelet, Béhar et Monin, 1986).

La figure 37 indique que, contrairement aux KC riches en pyrite, les asphaltènes de ces échantillons se situent bien dans la lignée II.

* les rapports N/C de tous les échantillons sont peu élevés et relativement proches (tableau 3). Les rapports S/C sont généralement très faibles, sauf pour l'échantillon n°139 (Viséen-Tournaisien, 614m, Sbaa N-1).

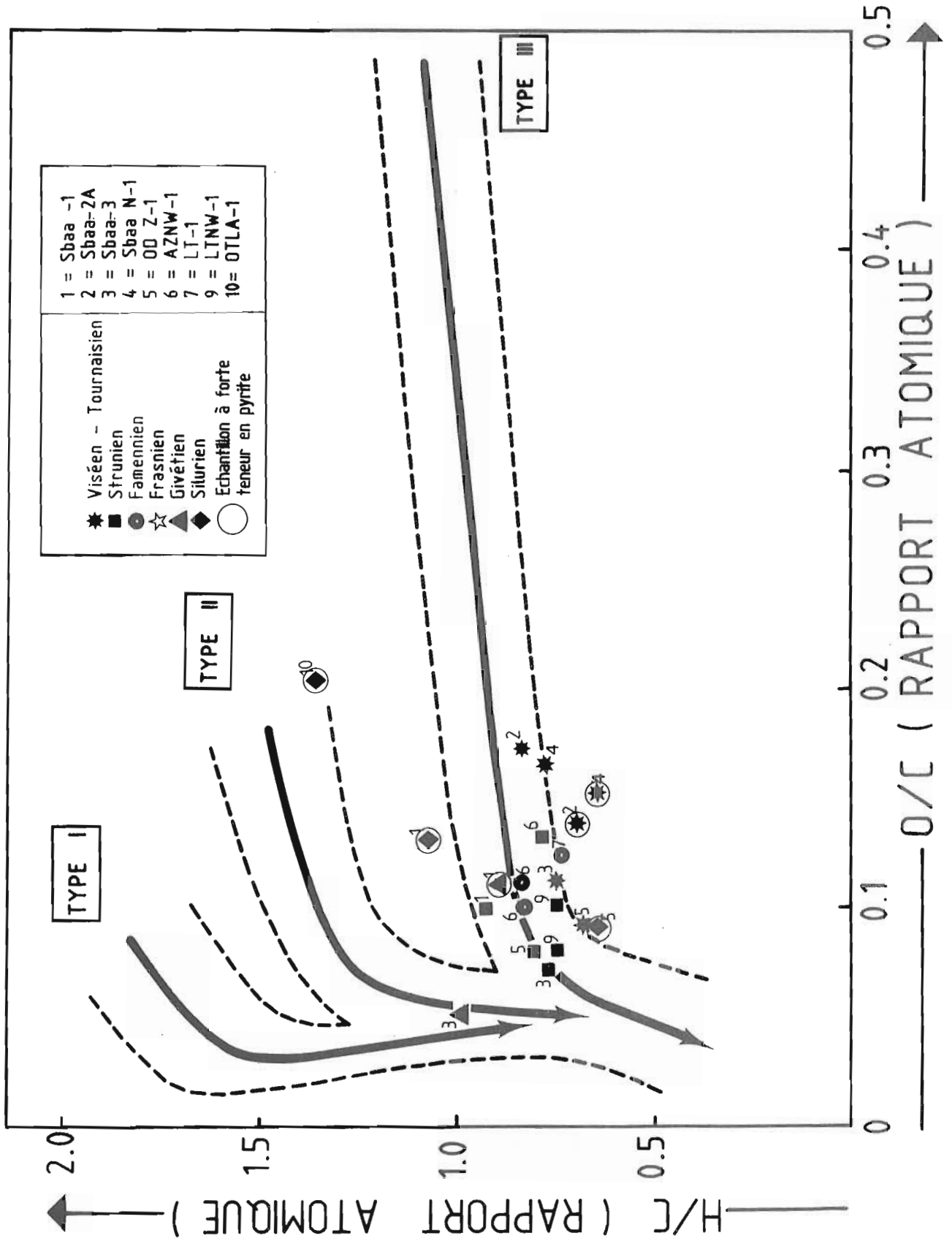


Fig.36 : Position des échantillons de kérène extrait (KC) dans un diagramme H/C - O/C .

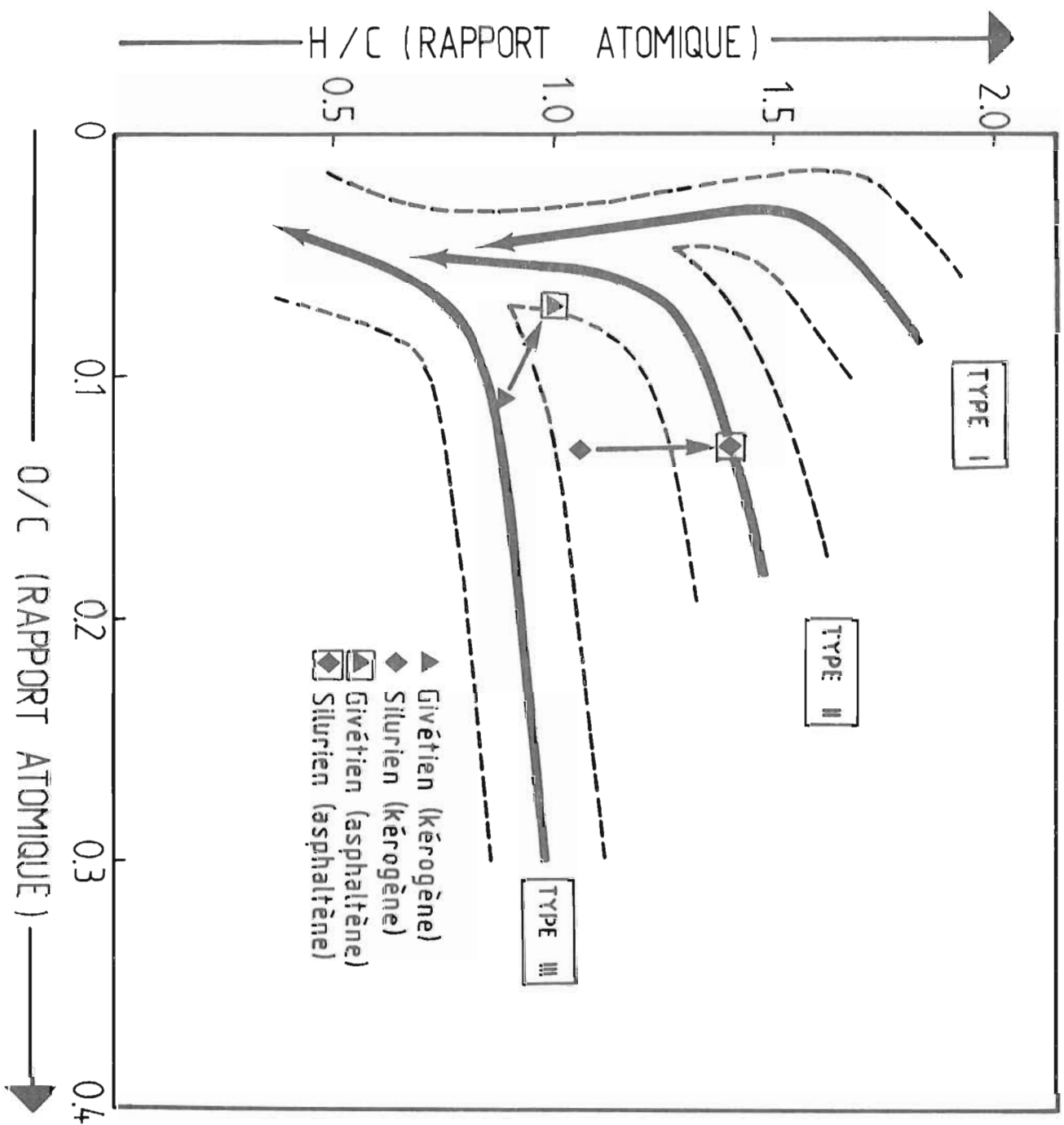


Figure 37 : Position des échantillons d'asphaltes et de kérogènes extraits (KT) du sondage Sbaa-1 dans un diagramme H/C-O/C

• 11-2-2-2- Pyrolyse Rock-Eval

Les résultats de la pyrolyse Rock-Eval des kérogènes bruts (KB) montrent des différences essentielles par rapport à ceux des roches brutes (tableau 4 et figures 38 à 42):

* l'évolution avec la profondeur des teneurs en hydrocarbures potentiels (IH) est globalement la même que celle des mêmes teneurs pour les roches brutes (figures 21 et 38).

Toutefois, dans le détail, nous constatons que les IH des échantillons du Tournaisien, du Strunien et du Famennien sont plus élevés dans le cas de kérogènes que dans le cas des roches brutes. Ceci pourrait être expliqué par l'effet de matrice: en effet, les teneurs en C organique des roches brutes de ces trois étages (voir paragraphe B-11-2-1-1 ci-dessus) sont relativement basses, et Espitalié et al. (1985) ont montré que la proportion d'hydrocarbures retenus par les minéraux au cours de la pyrolyse est d'autant plus importante que la teneur en matière organique du sédiment est faible.

Par ailleurs, d'autres échantillons, notamment ceux du Givétien, présentent au contraire des IH plus faibles pour les kérogènes que pour les roches brutes, ce qui pourrait être expliqué par la solubilisation de certains composés organiques lors de l'isolement du kérogène.

* les valeurs des Tmax des kérogènes du Tournaisien, du Strunien et du Famennien sont beaucoup moins dispersées (entre 430 et 440°C) que celles des roches brutes correspondantes (figures 23 et 39).

* les IO des kérogènes de tous les échantillons sont nettement moins dispersés et plus faibles (inférieures à 20 mg de CO₂ / g de COT) que ceux des roches brutes correspondantes (figures 22 et 40).

Les points représentatifs des kérogènes de tous les étages se localisent entre les lignées II et III dans un diagramme IH-IO (figure 41). Contrairement aux roches brutes (voir paragraphe B-11-2-1-2 ci-dessus), aucune distinction ne peut être faite entre matière organique du Carbonifère inférieur et du Dévonien d'une part, et matière organique du Dévonien moyen et du Silurien d'autre part.

Cette distinction se retrouve par contre dans un diagramme IH-Tmax (figure 42): les points représentatifs du Tournaisien, du Strunien et du Famennien se regroupent en dessous de Tmax= 440°C et, soit sur la lignée III, soit dans le domaine correspondant aux matières organiques mélangées ou altérées; les ~~kérogènes du Frasnien, du Givétien et du Silurien se situent au dessus de~~ Tmax= 440°C et sur la lignée II, avec des IH variant de 9 mg HC / g COT pour les échantillons les plus matures (base du Silurien du sondage 002-1) à 600 mg HC / g COT pour les moins matures (Silurien du sondage 0TLR-1).

N°	Sondage	Etage	Profondeur m	C.org. %	S ₁ HC mg/gKB	S ₂ HC mg/gKB	S ₃ CO ₂ mg/gKB	S ₁ +S ₂ mg/gCOT	IP %	IH HC mg/gCOT	IO CO ₂ mg/gCOT	T _{max} . °C
6	SBAA-1	Tournaisien	502,80	2,15	2,10	8,00	0,15	470	21	372	7	429
16		Strunien	644,80	51,40	7,40	196,60	3,10	397	4	382	6	438
18		Givétien	1312,80	27,70	1,60	44,90	0,00	168	3	162	0	445
19		Givétien	1316,80	28,40	2,97	113,43	1,93	410	2	399	7	443
22		Silurien	1331,40	20,60	3,40	80,10	0,00	405	4	388	0	450
29		Silurien	1417,60	12,20	3,70	39,50	0,00	354	9	323	0	447
60	SBAA-3	Tournaisien	438,80	34,80	7,00	62,00	3,70	198	10	178	10	436
66		Strunien	744,50	45,20	7,60	134,90	4,40	315	5	298	9	440
69		Frasnien	1289,80	15,30	3,00	35,80	2,10	254	8	233	13	444
72		Givétien	1336,70	24,78	2,00	51,65	2,15	216	4	208	8	442
74		Givétien	1342,20	49,10	2,30	158,40	1,70	327	1	322	3	449
76		Silurien	2049,00	23,65	3,40	4,15	2,70	32	45	17	11	
129	SBAA-2A	Viseën/ Tournaisien	522,20	12,70	2,10	17,40	1,40	153	11	137	11	437
132	SBAA-2A	Tournaisien	638,60	9,70	3,20	29,20	1,20	334	10	301	12	436
139	SBAAN-1	Viseën/ Tournaisien	614,00	18,10	1,00	31,65	2,45	180	3	175	13	436
144	SBAAN-1	Tournaisien	734,70	15,70	0,70	26,70	2,20	175	2	170	14	435
83	ODZ-1	Tournaisien	764,25	44,80	8,25	118,45	5,55	283	6	264	12	436
85		Tournaisien	813,10	51,80	4,40	102,70	4,70	207	4	198	9	438
87		Strunien	1110,50	41,30	6,70	170,70	3,80	430	4	413	9	443
89		Silurien	2107,30	12,70	1,10	1,20	1,30	18	48	9	10	449
32	AZNW-1	Strunien	803,10	57,50	4,05	180,30	8,90	321	2	314	15	433
41		Strunien	867,75	50,00	1,77	106,60	6,70	217	1	213	13	434
49		Famenien	905,40	59,30	2,65	159,40	8,55	273	2	269	14	434
54		Famenien	1121,70	36,00	2,60	66,20	3,30	191	4	183	9	436
94	OTLA-1	Silurien	1590,80	16,70	2,20	100,20	0,10	613	2	600	1	447
105	LTNW-1	Strunien	1458,00	37,45	1,50	98,80	5,95	268	1	264	16	437
109	LTNW-1	Strunien	1529,55	53,70	1,60	127,20	6,62	240	1	237	12	436
110	LTNW-1	Strunien	1533,55	62,65	2,60	148,00	7,10	240	2	236	11	438
116	LT-1	Famenien	1062,10	37,30	2,95	86,90	14,30	241	3	233	20	432
149	LT-2		1427,60	65,10	4,05	135,10	7,70	214	3	208	11	435

Tableau 4 : Teneurs en carbone organique et valeurs des différents paramètres tirés de l'analyse en pyrolyse Rock-Eval des kérogènes bruts des sédiments paléozoïques de la cuvette de SBAA-(S₁+S₂=potentiel pétrolier; IP= $\frac{S_1}{S_1+S_2}$ =index de production; IH=index d'hydrogène; IO=index d'oxygène; Tmax=température au sommet du pic S₂). N.B. : Le carbone organique a été mesuré par le Rock-Eval.

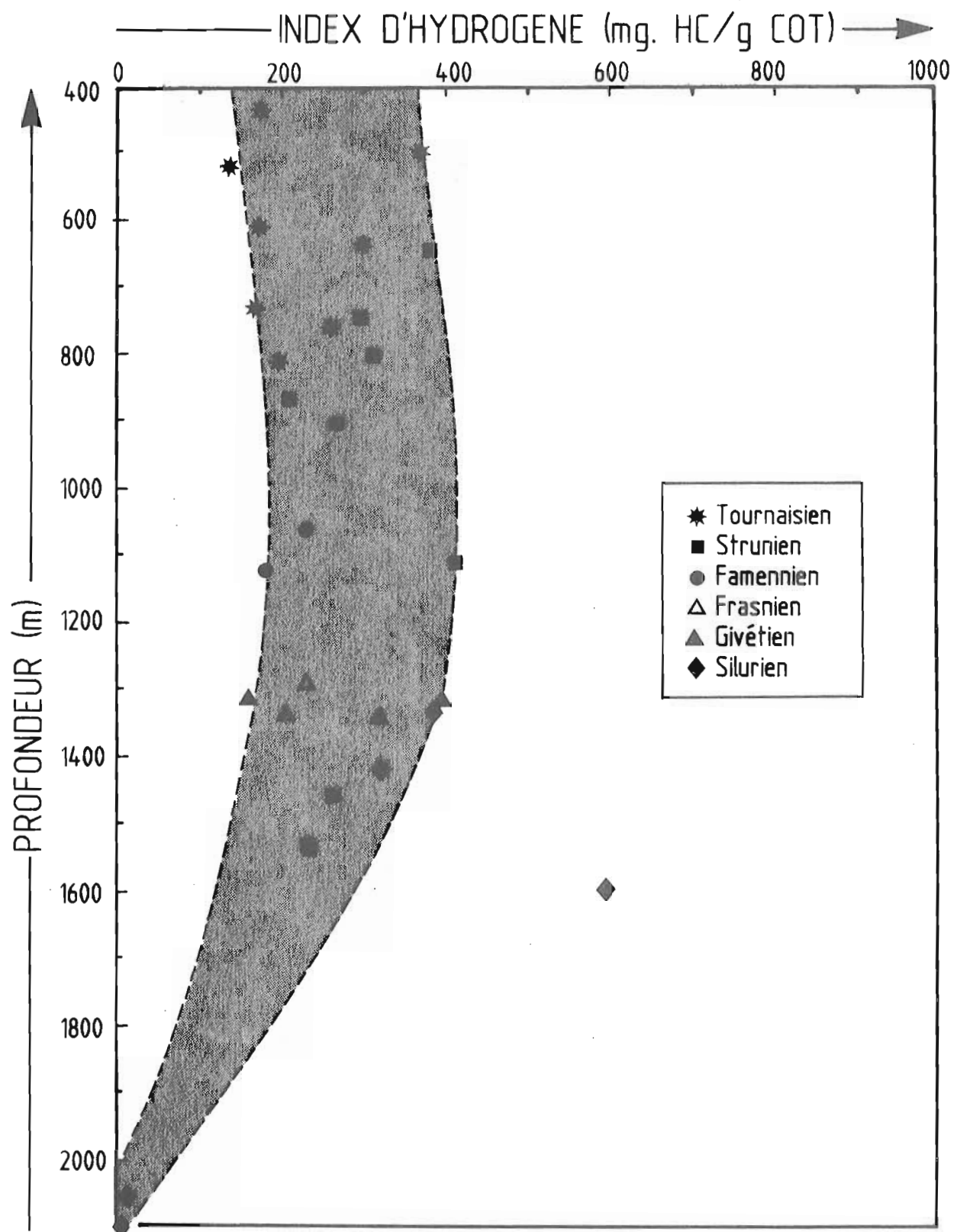


Fig. 38 : Evolution de l'index d'hydrogène des kérogènes bruts (KB) en fonction de la profondeur .

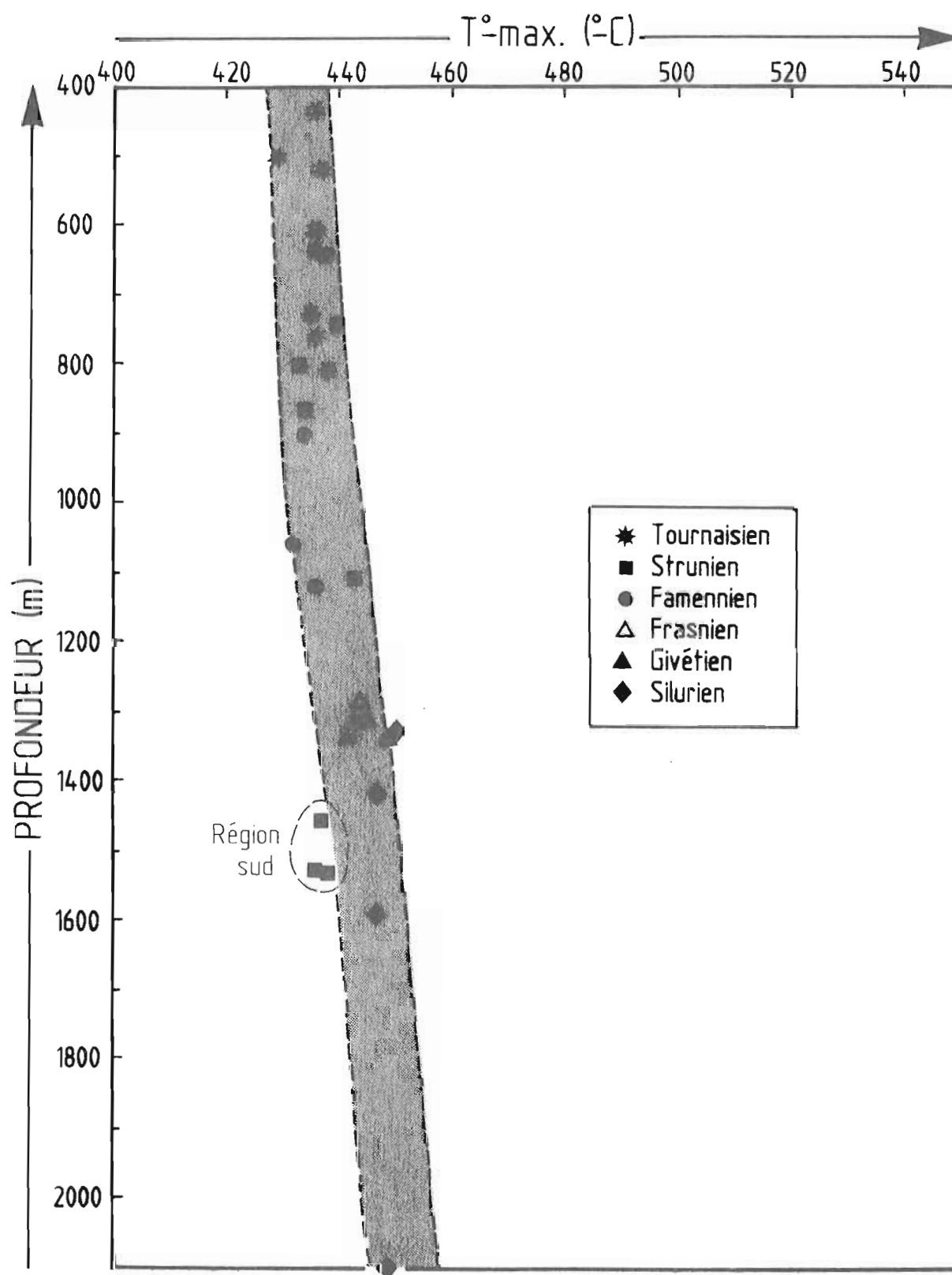


Fig. 39 : Evolution du $T^{\circ}\text{max}$ des kérogènes bruts (KB) en fonction de la profondeur .

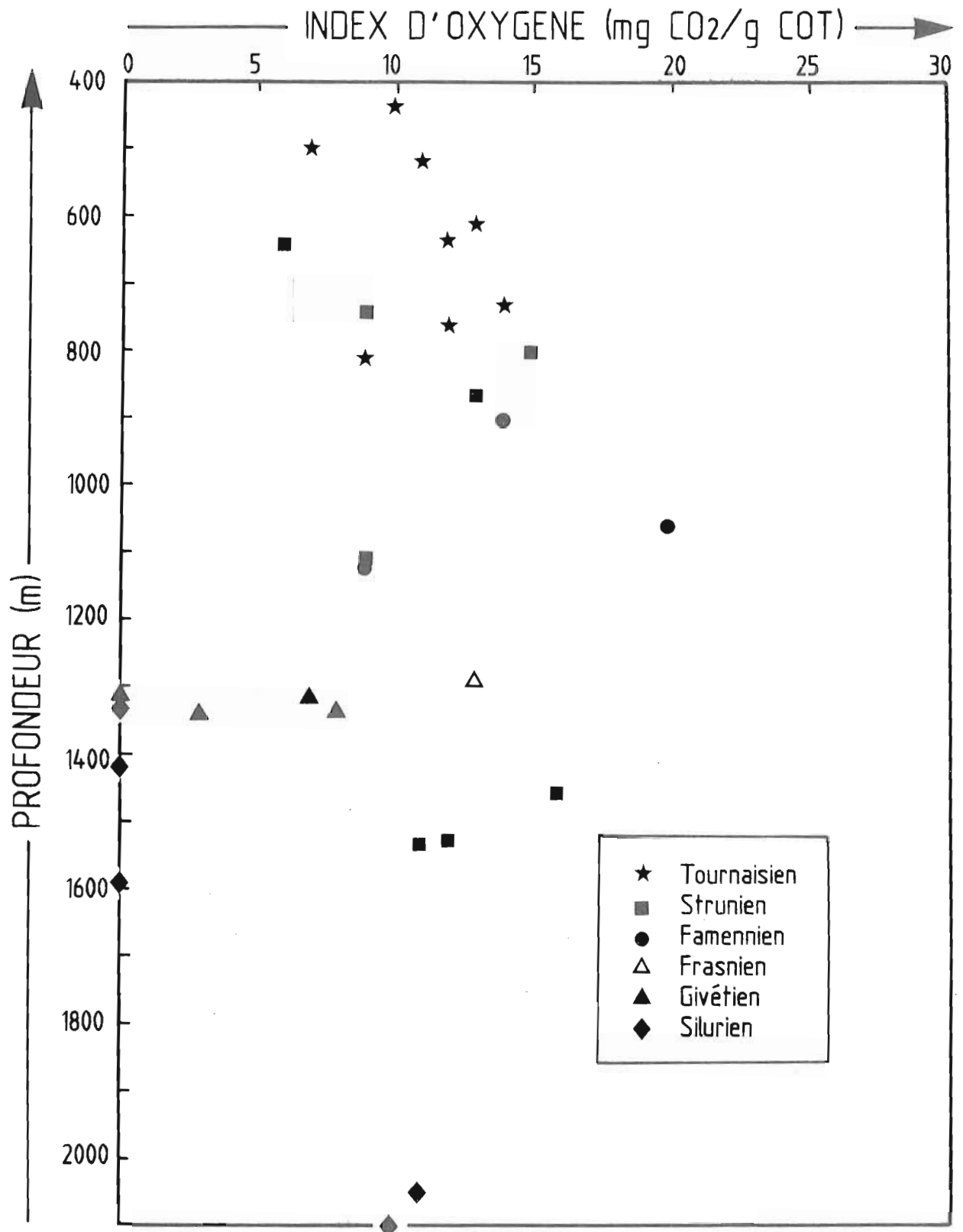


Fig. 40 : Index d'oxygène des kérogènes bruts (KB) en fonction de la profondeur .

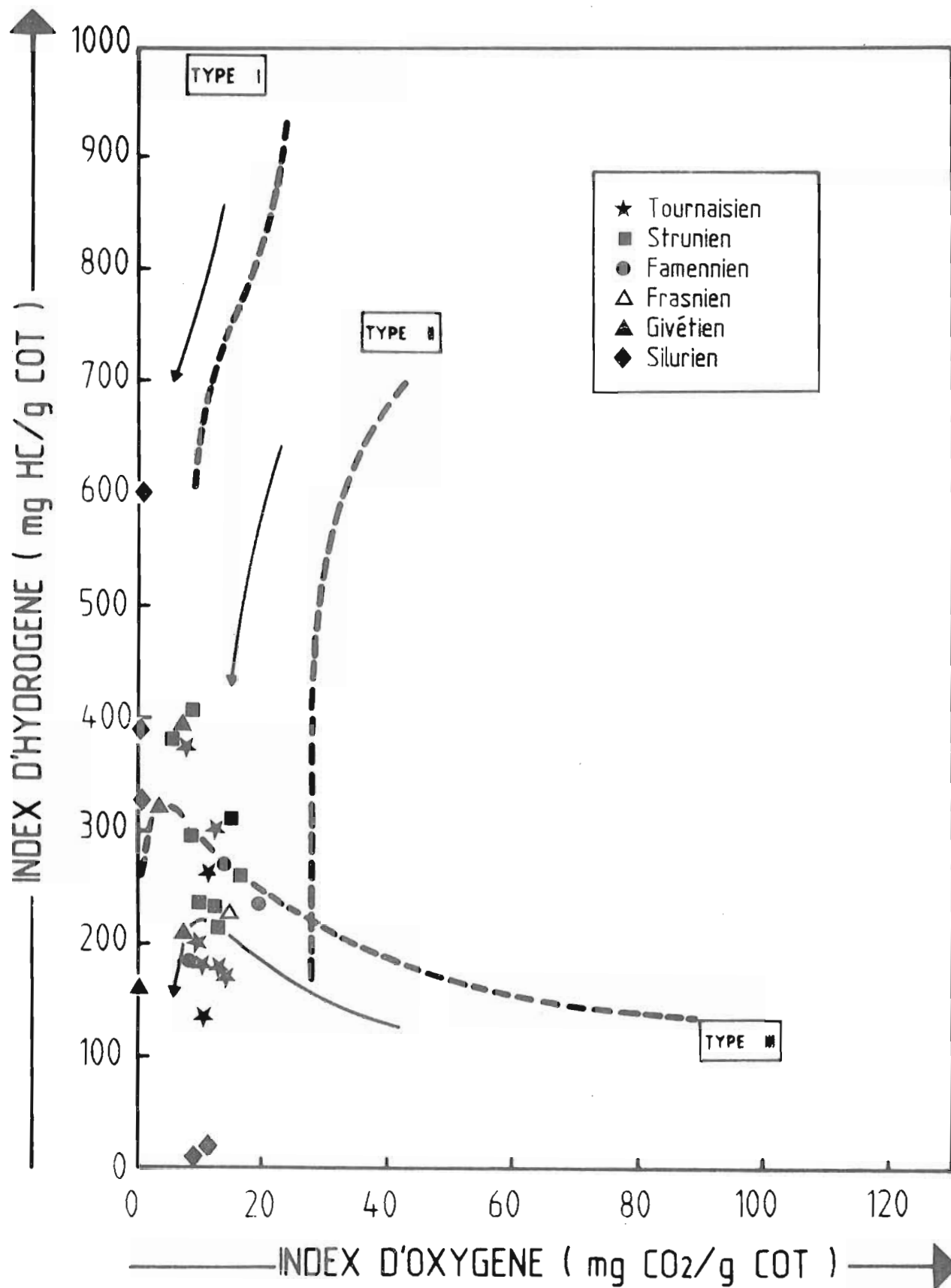


Fig. 41 : Position des échantillons de kérogène brut (KB) dans un diagramme IH/IO .

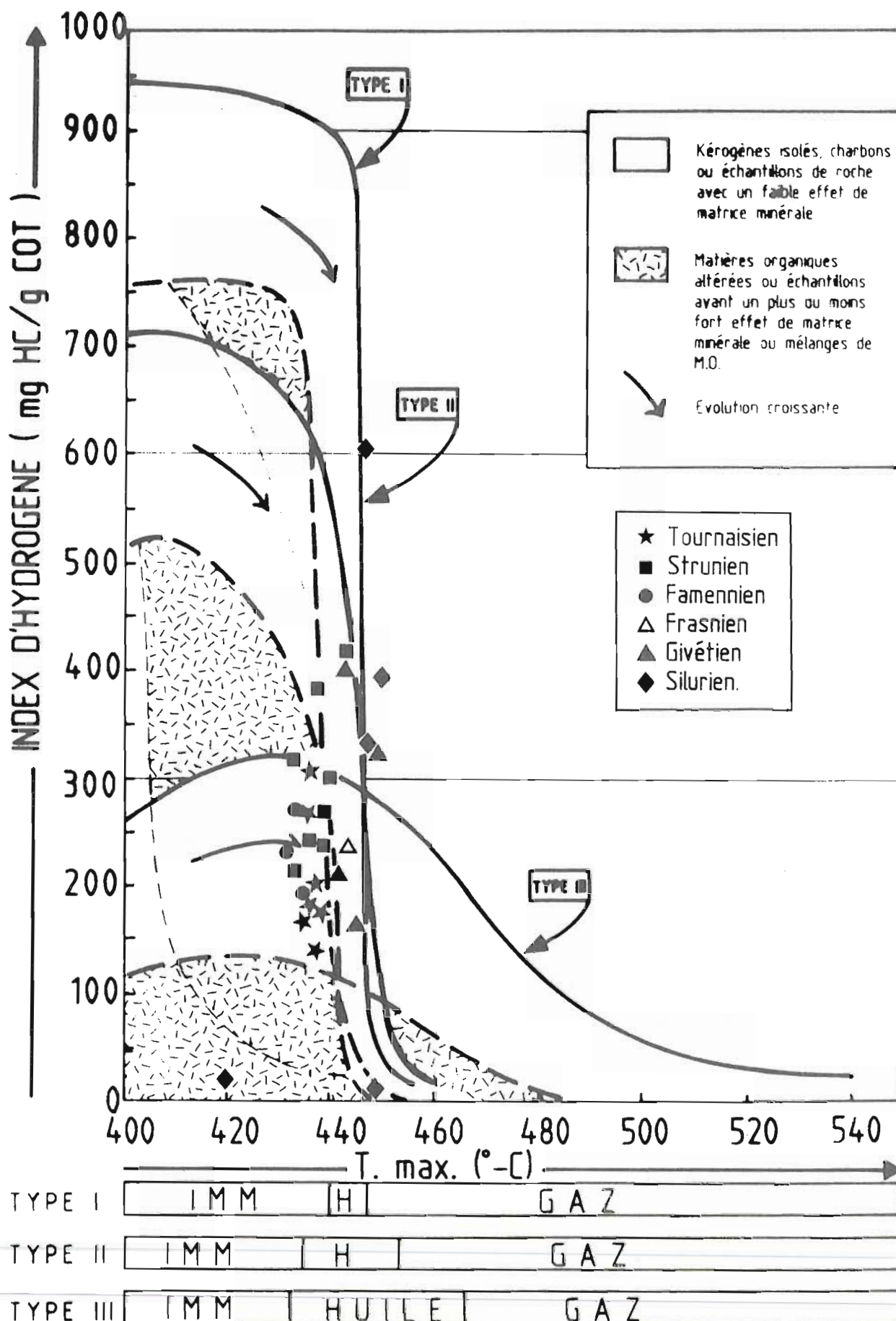


Fig. 42 : Position des échantillons de kérogène brut (KB) dans un diagramme IH/T[°] max .

• 11-2-2-3- Spectroscopie d'absorption infrarouge

L'attribution des bandes d'absorption de la lumière infrarouge à des groupements fonctionnels a été faite sur la base de nombreux travaux de référence (tableau 5), particulièrement les synthèses de Espitalié et al. (1973), Robin (1975) et Robin et al. (1977).

Les figures 43 à 46 montrent les spectres d'absorption de la lumière infrarouge relatifs aux kérogènes extraits (KC) du Tournaisien, du Strunien, du Givétien et du Silurien.

D'après ces figures, il apparaît:

* dans tous les kérogènes étudiés, la bande située à 3400 cm^{-1} est mal résolue;

* les bandes d'absorption des CH aliphatiques ($2960\text{--}2870\text{ cm}^{-1}$) sont en général plus intenses pour la base du Givétien et pour le Silurien que pour le Tournaisien et le Strunien. Les bandes dues aux vibrations de déformation CH₂ et CH₃ (1450 cm^{-1}) sont présentes et d'intensité moyenne dans tous les échantillons;

* la bande attribuée aux groupements carbonyle C=O (1710 cm^{-1}) des acides, cétones et aldéhydes aromatiques est absente sauf pour l'échantillon le plus superficiel du Tournaisien (n° 60, Sbaa-3, 438,80m; figure 43);

* la bande d'absorption dont le maximum se situe vers 1600 cm^{-1} et attribuée à des fonctions oxygénées (Espitalié et al., 1973) semble être présente dans tous les spectres sauf dans ceux du Silurien (mis à part l'échantillon très mature n° 89, 002-1, 2107,30m; figure 46);

* l'intensité des bandes CH aromatiques situées entre 700 et 930 cm^{-1} est faible pour tous les échantillons;

* un échantillon du Strunien (n° 16, Sbaa-1, 644,80m) se singularise par la présence d'une large bande due aux vibrations de valence C-O et C-C, d'intensité très forte, dont le maximum se situe vers $1030\text{--}1040\text{ cm}^{-1}$. D'après Espitalié et al. (1973), cette bande indique la présence de fonctions phénol. Toutefois, dans cette hypothèse, ces fonctions devraient apparaître d'une manière aussi nette en pyrochromatographie, ce qui n'est pas le cas (voir paragraphe B-11-2-2-4 ci-dessous); il semblerait donc que la forte intensité de cette bande soit due à la présence d'eau résiduelle.

La figure 47 montre l'évolution de ces différentes bandes en fonction de la profondeur en ce qui concerne les sondages Sbaa-1, Sbaa-2A, Sbaa N-1 et

Position (cm^{-1})	Particularités des bandes d'absorption	Attribution aux groupements fonctionnels responsables de l'absorption
3400	large	Vibration de valence OH
3060	faible	Vibration de valence CH aromatique
2960-2870	double	Vibration de valence : - 2960, asymétrique CH_3 ; - 2870, symétrique CH_3 ; - 2926, asymétrique CH_2 ; - 2853, symétrique CH_2 ; - 2890, CH
1710	-	Vibration de valence C=O
1630-1610	-	Vibration de valence C=O quinonique ponté Vibration de valence C=C oléfinique et aromatique Vibration de déformation H_2O
1455	-	Vibration de déformation asymétrique CH_2 et CH_3
1380-1375	-	Vibration de déformation symétrique CH_3
1400-1040	large massif d'absorption	Vibration de valence C-C et C-O Vibration de déformation OH
1800- 930	large massif sans les bandes à 1700-1600, 1455 et 1375 cm^{-1}	Vibration de valence C-C, C-O et C-O-C et de déformation OH
930- 700	3 bandes en général	Vibration de déformation hors du plan CH aromatique
720	-	Vibration de déformation (CH_2) _n avec $n \geq 4$

Tableau 5 : Attribution des principales bandes d'absorption de la lumière infrarouge des kérogènes, (d'après Pozefsky et Coggeshall, 1951; Bellamy, 1958; Alpert et al., 1970; Espitalié et al., 1973; Robin, 1975; Robin et al., 1975; Rouxhet et al., 1980)

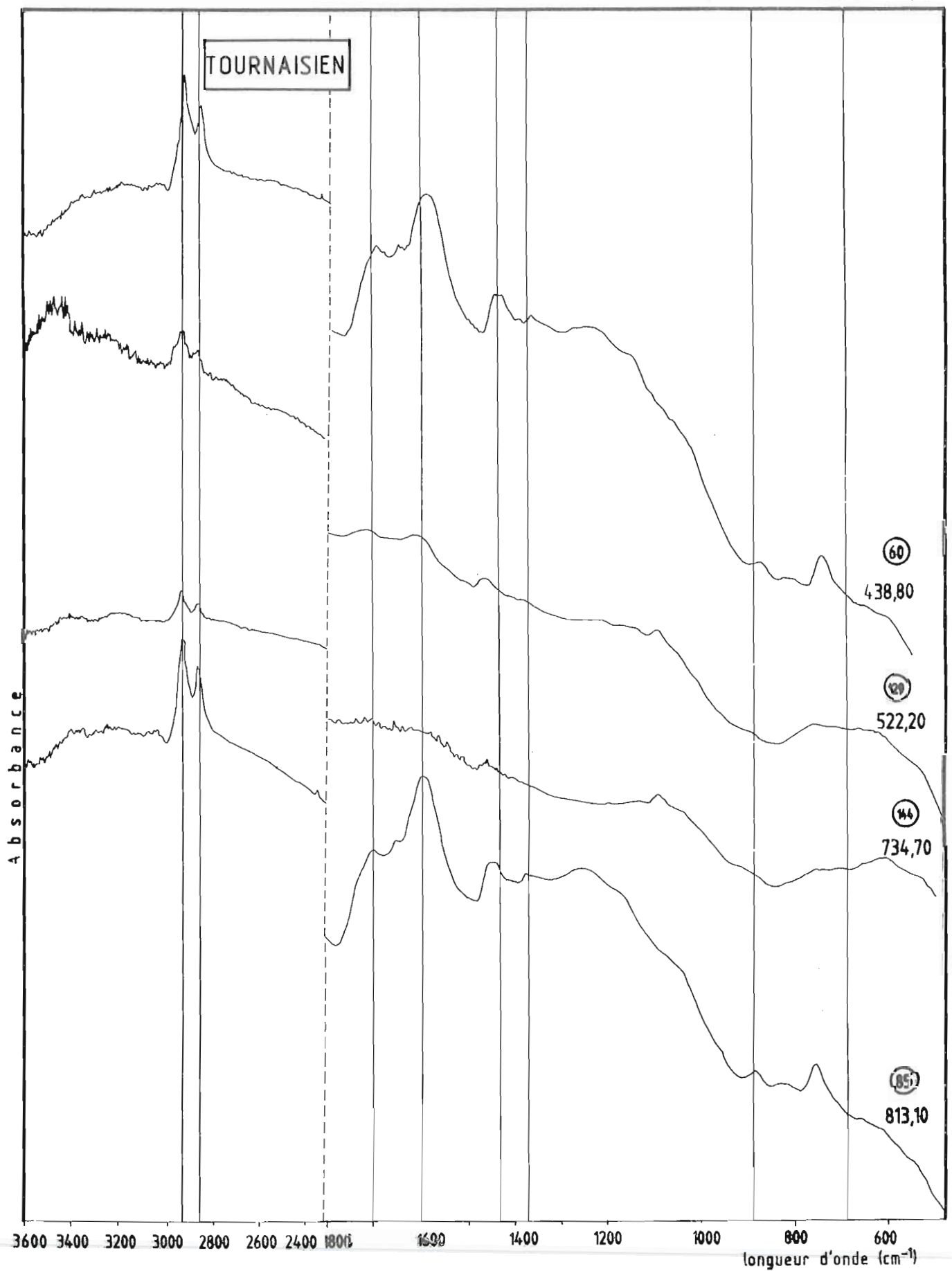


Figure 43 : Spectres I.R. des kérogènes extraits (KC) des sédiments du Tournaisien du bassin de Sbaa

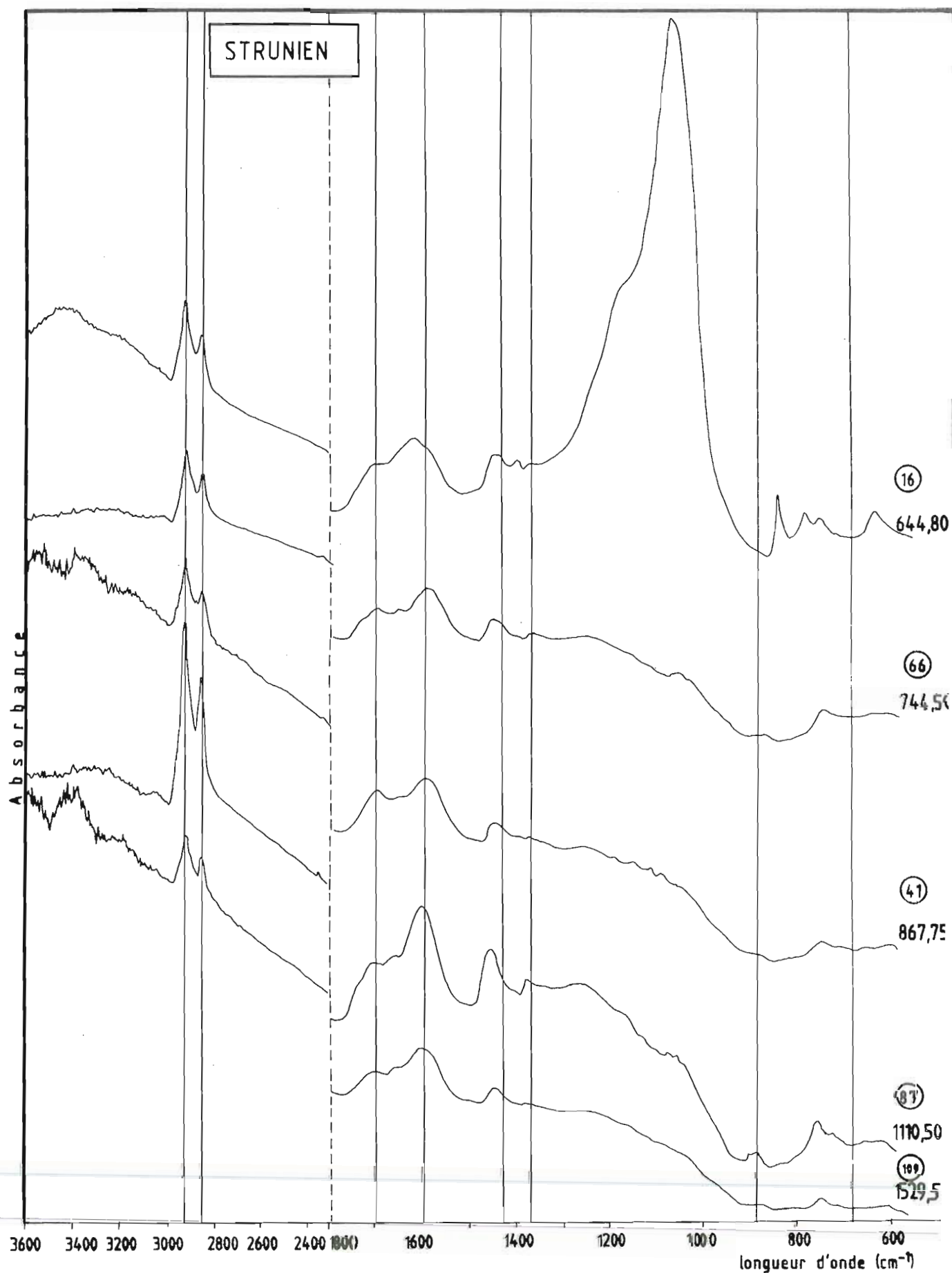


Figure 44 : Spectres I.R. des kérogènes extraits (KC) des sédiments du du Strunien du bassin de Sbaa.

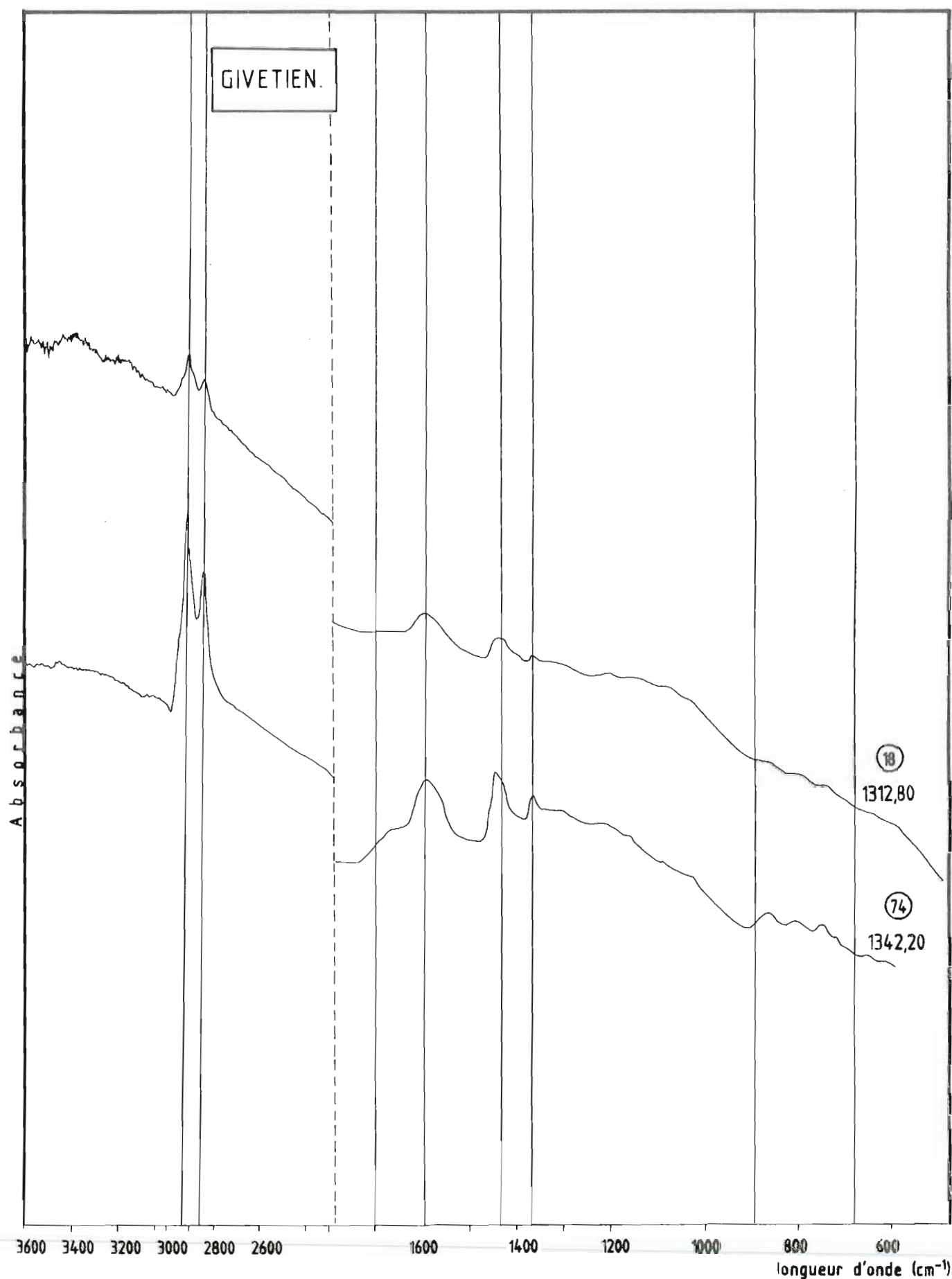


Figure 45 : Spectres I.R. des kérogènes extraits (KC) des sédiments du Givétien du bassin de Sbaa .

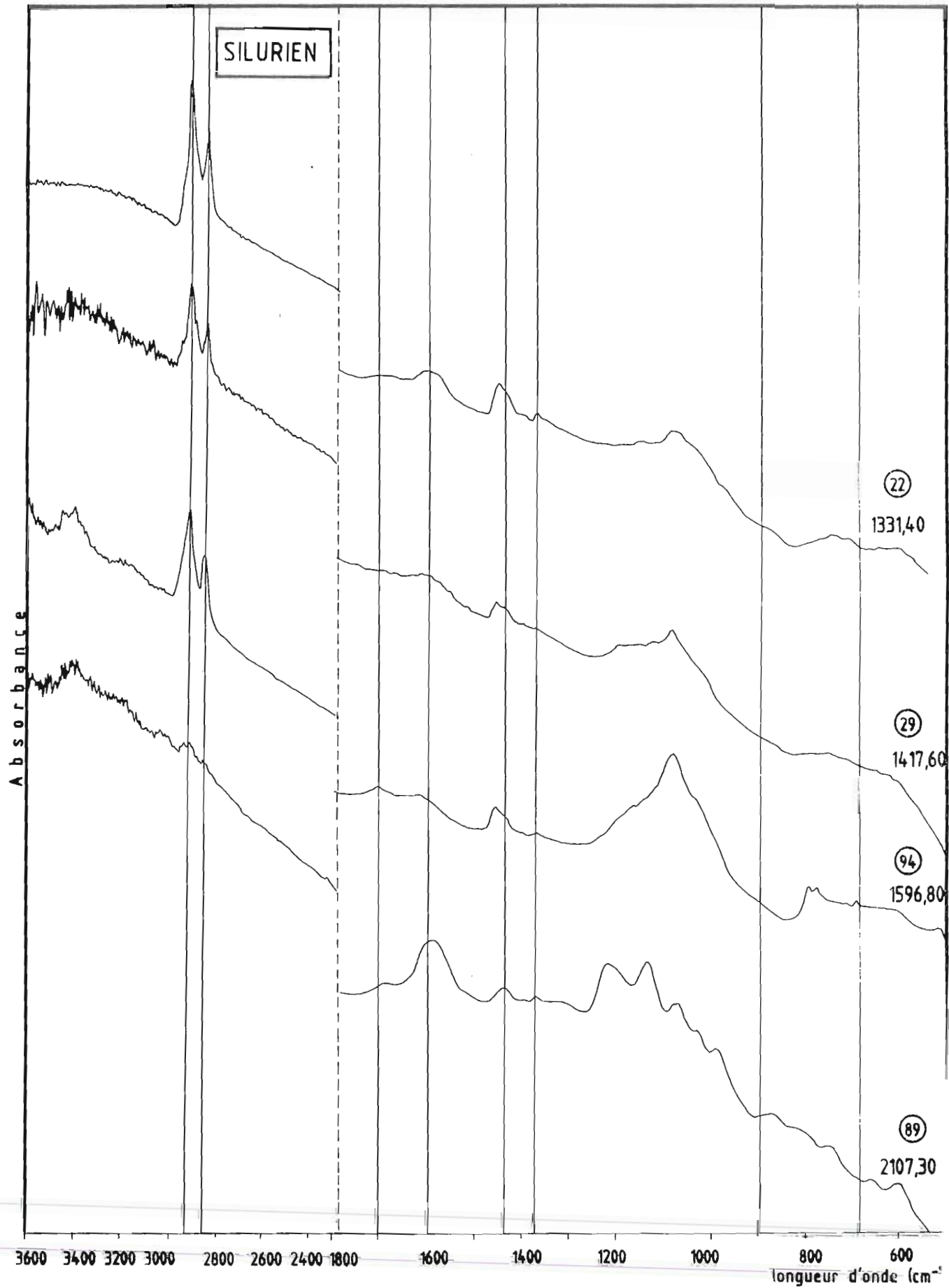


Figure 46 . Spectres I.R. des kérogènes extraits (KC) des sédiments du Silurien du bassin de Sbbaa .

Absorbance

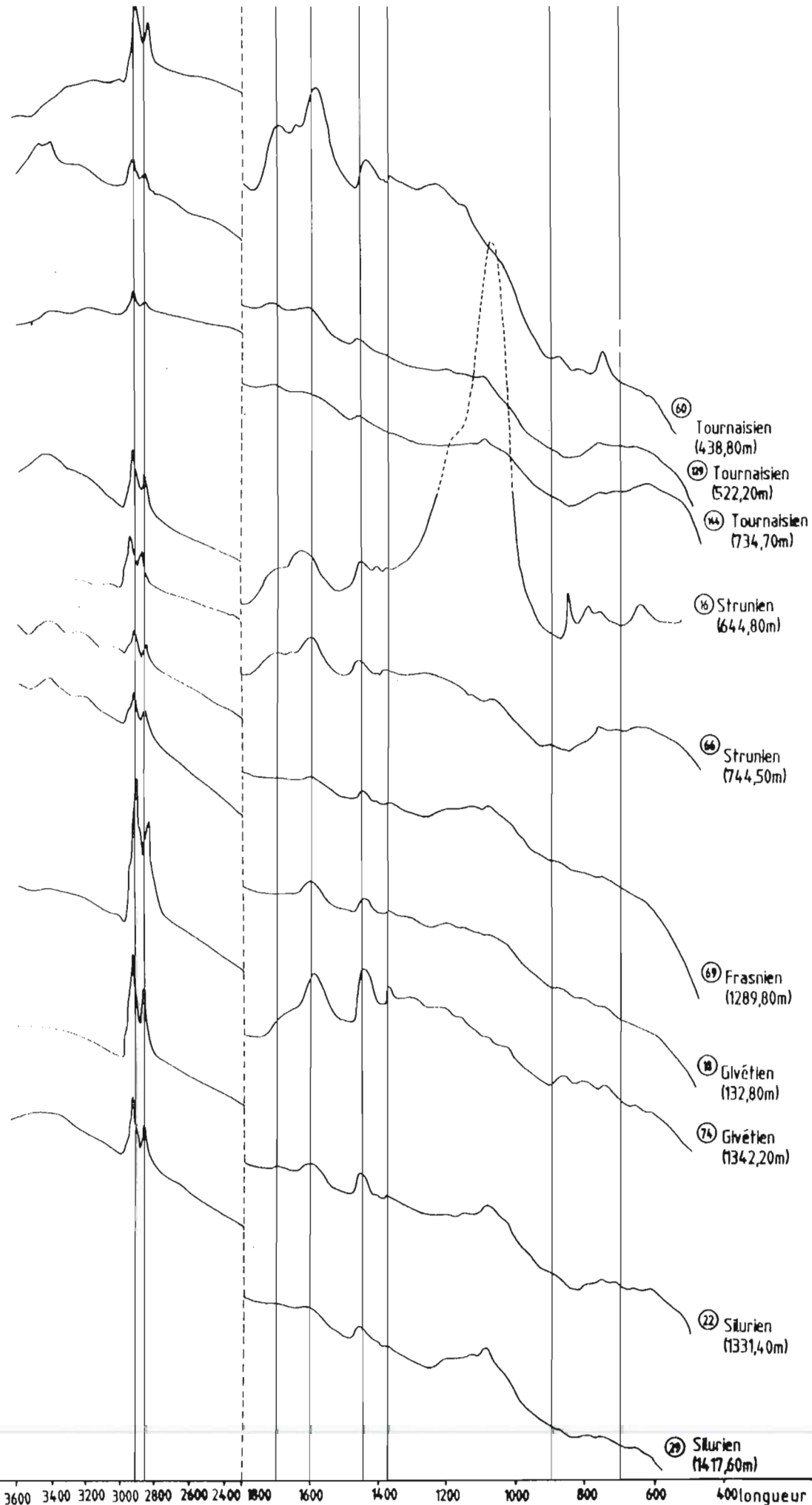


Figure 47 : Evolution des spectres I.R. des kérogènes extraits (KC) des sédiments paléozoïques du bassin de Sbaa .

N°	Etage	Profondeur (m)	Sondage	λ	IH (mg/g COT)
60	Tournaisien	438,80	SBAA-3	1,68	178
129	Tournaisien	522,20	SBAA-2A	3,67	137
144	Tournaisien	734,70	SBAA N-1	3,47	170
85	Tournaisien	813,10	ODZ-1	1,75	198
16	Strunien	644,80	SBAA-1	2,33	382
66	Strunien	744,50	SBAA-3	2,53	298
41	Strunien	867,75	AZNW-1	3,05	213
87	Strunien	1110,50	ODZ-1	3,09	413
109	Strunien	1529,55	LTNW-1	2,48	237
116	Famennien	1062,10	LT-1	2,12	233
54	Famennien	1121,70	AZNW-1	2,35	183
69	Frasnien	1289,80	SBAA-3	2,88	233
18	Givétien	1312,80	SBAA-1	2,91	162
74	Givétien	1342,20	SBAA-3	5,78	322
22	Silurien	1331,40	SBAA-1	6,76	388
29	Silurien	1417,60	SBAA-1	8,50	323
94	Silurien	1596,80	OTLA-1	6,49	600
89	Silurien	2107,30	ODZ-1	0,79	9

Tableau 6 : Valeurs des coefficients d'absorption (unités arbitraires de surface rapportées à 1 mg de carbone organique) relatives à la bande à 2960 cm^{-1} (λ) et des index d'hydrogène (IH) des kéroènes extraits (KC) du bassin de SBAA.

Sbaa-3. Il n'apparaît, globalement, aucune logique particulière; néanmoins, l'examen de cette évolution, étage par étage, montre:

- * une atténuation très nette de la bande due aux vibrations C-O et C-C pour le Strunien.

- * une diminution de la bande des CH aliphatiques, de la bande des fonctions carbonyl, et de celle attribuée aux fonctions oxygénées (1600 cm^{-1}) pour le Tournaisien et l'ensemble base du Givétien-Silurien;

Nous avons cherché à corrélér, en nous basant sur les travaux de Robin (1975), la diminution du coefficient d'absorption (surface de la bande ramenée à 1 mg de C organique) des CH aliphatiques avec celle de la teneur en hydrogène de l'échantillon (évaluée par l'index d'hydrogène IH dans notre cas). Aucune corrélation n'apparaît, sauf dans le cas du Silurien (tableau 6); ceci pourrait être dû au caractère homogène, de type II, de la matière organique de cet étage (voir paragraphe B-11-2-1-2).

• 11-2-2-4- Couplage pyrolyse-chromatographie gazeuse

Comme nous l'avons précisé dans le paragraphe A-11-4-3-4 ci-dessus, cette étude a été menée dans le but de préciser la composition des effluents de pyrolyse issus du craquage thermique à 550°C.

Les pyrochromatogrammes obtenus par cette méthode sont présentés dans la figure 48. Ceux des deux échantillons du Silurien analysés (n° 22 et n° 29) s'étant révélés semblables, nous n'en présentons qu'un dans cette figure. Notons que les composés strictement gazeux libérés par la pyrolyse (C1-C4) apparaissent dans le premier pic, mal résolu, des pyrochromatogrammes.

Nous constatons, en comparant ces pyrochromatogrammes, que le Tournaisien et le Strunien se différencient du Givétien et du Silurien dans la gamme C4-C15 par la présence de multiples pics s'intercalant entre n-C6 et n-C10 et possédant de fortes intensités relatives par rapport aux n-alcanes/n-alcènes. Ces pics sont attribués en grande majorité à des composés oxygénés, notamment phénoliques (Tissot and Welte, 1978).

D'autre part, les pyrochromatogrammes du Givétien et du Silurien révèlent une décroissance régulière, avec l'augmentation du nombre de C, des pics des n-alcanes/n-alcènes; des composés à haut poids moléculaire (>C25) n'étant présents que dans le Silurien.

Globalement, ces résultats indiquent que la matière organique du Givétien/Silurien est d'origine marine (Béhar and Pelet, 1985), alors que celle du Tournaisien/Strunien est vraisemblablement d'origine à la fois

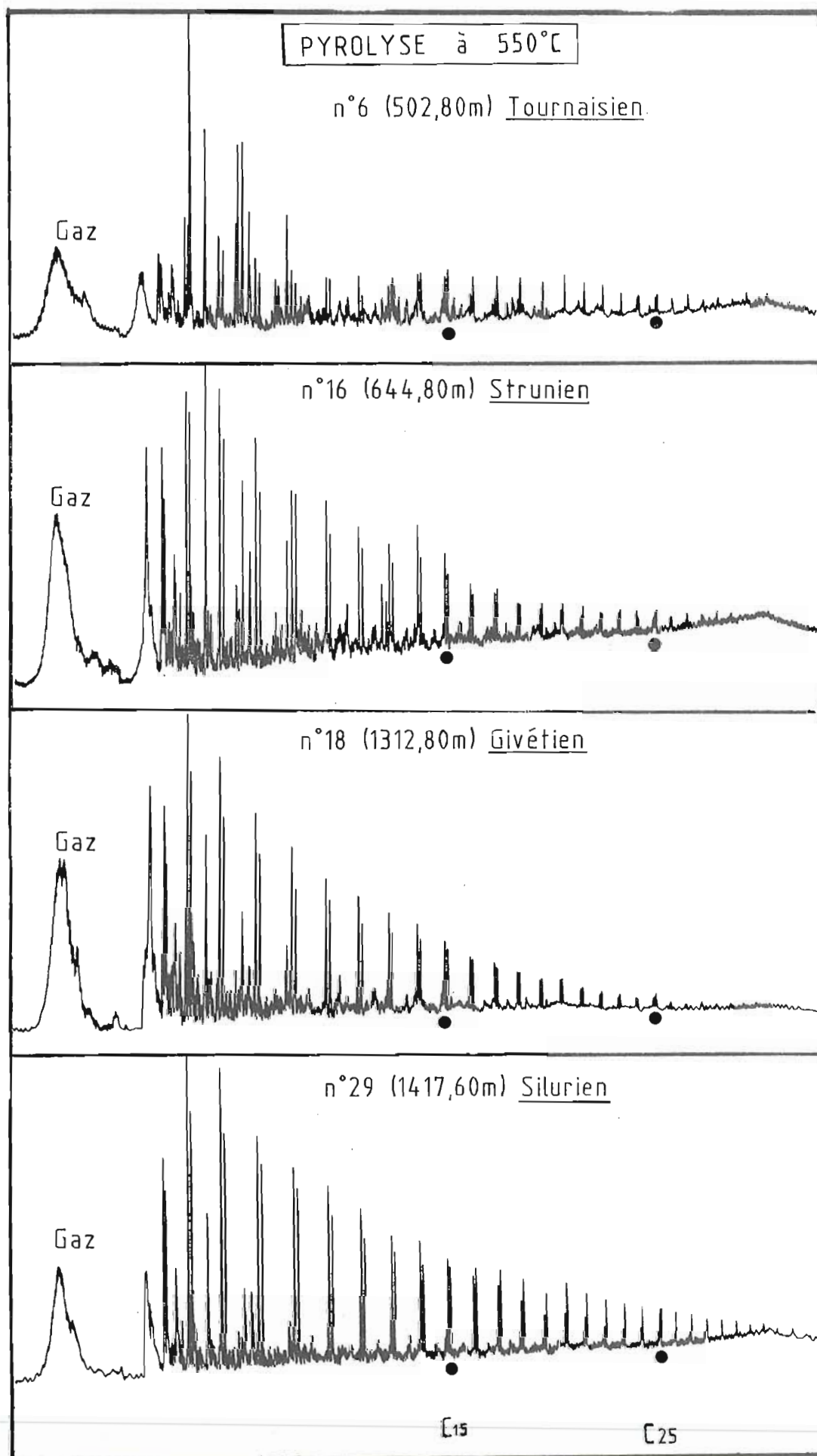


Figure 48 : Pyrochromatogrammes obtenus par pyrolyse à 550°C d'échantillons de kérogènes bruts (KB) des niveaux du Tournaisien, Strunien, Givétien et Silurien du sondage Sbaa-1 .

continentale et marine. En effet, l'abondance des composés phénoliques traduit une origine continentale de la matière organique de ces deux derniers étages, mais l'absence d'un mode autour de C30 indique que cette origine n'est pas unique, ce que confirme la présence de n-alcanes/n-alcènes.

11-2-3- Etude des extraits chloroformiques des roches brutes et des kéroènes

• 11-2-3-1- Teneurs en extrait

a) Roches brutes

34 échantillons provenant des différents sondages ont été soumis à une extraction chloroformique. Les rendements d'extraction (teneur en extrait de la roche) sont présentés dans les tableaux 7 et 8 et la figure 49.

D'une manière générale, les plus forts rendements se retrouvent au niveau de certains échantillons du Tournaisien: 441 et 885 mg d'extrait / g COT, respectivement pour les échantillons n° 132 et n° 6. Ces niveaux, appartenant à la formation des "Grès de Sbaa", sont connus pour être des réservoirs (voir Introduction).

Les rendements les plus faibles sont enregistrés pour les échantillons du Strunien et du Famennien (10 à 47 mg d'extrait / g COT).

Ainsi que le montre la figure 49, et sans tenir compte des échantillons du Tournaisien qui ont été imprégnés par des huiles allochtones (voir paragraphe 11-2-3-3), les rendements d'extraction augmentent avec la profondeur jusqu'à atteindre un maximum de 120 mg d'extrait / g COT à 1331,40 m (n° 22, Silurien), puis décroissent ensuite jusqu'à 10 mg d'extrait / g COT à 2107,30 m.

b) Kéroènes

La majorité (16) des échantillons de kéroène brut (KB) ont été soumis à une extraction chloroformique. Les rendements en bitumes de ces extractions sont présentés dans le tableau 9.

Ces rendements sont variables en ce qui concerne le Tournaisien (de 0,42 à 3,14 % du KB). Ils sont assez élevés en ce qui concerne le Givétien et le sommet du Silurien (2 % du KB) et ne sont plus que de 5 % du KB à la base du Silurien. L'évolution de ce rendement avec la profondeur paraît donc semblable à celle constatée pour les roches brutes (voir a) ci-dessus).

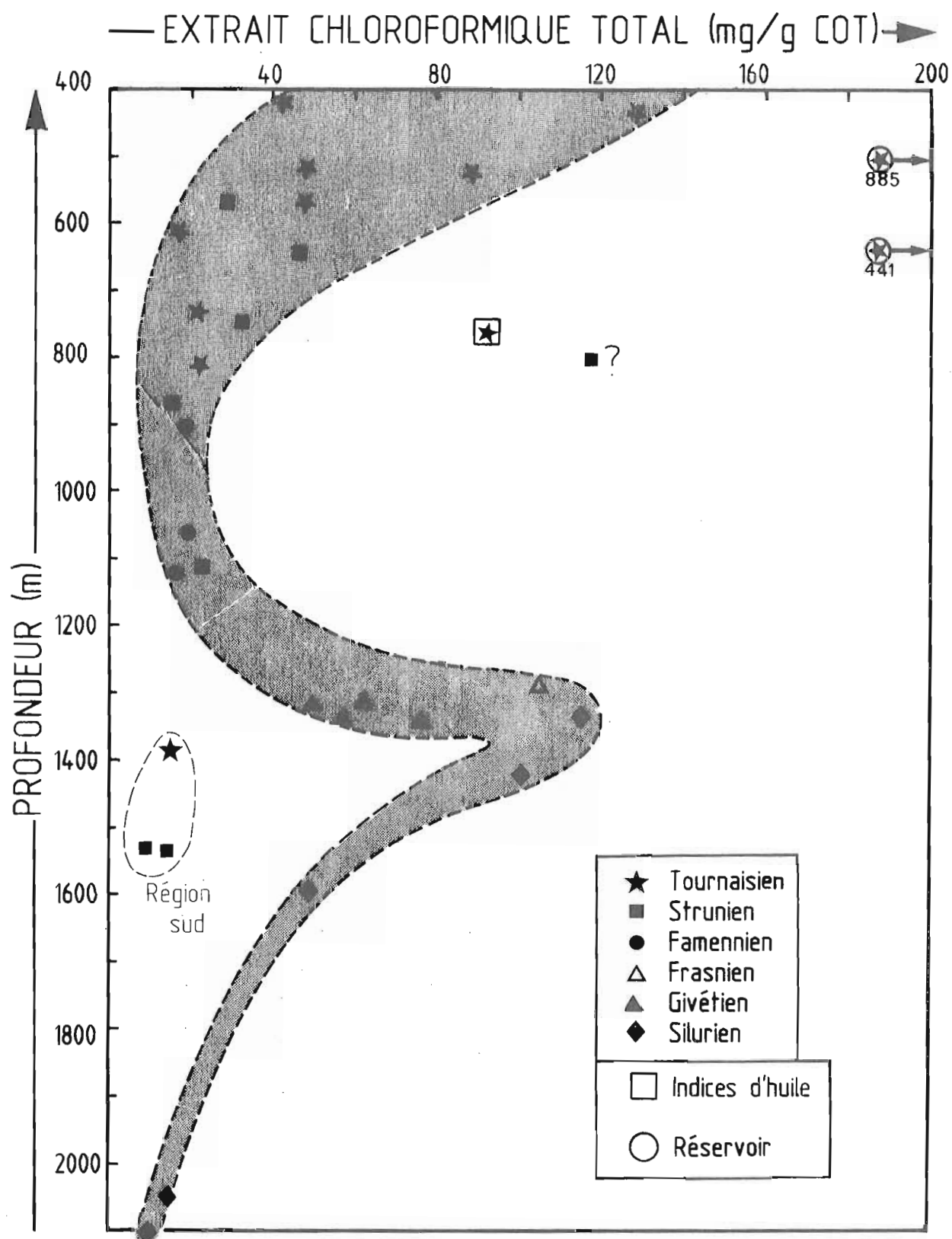


Fig. 49 : Evolution de l'extrait chloroformique total des sédiments bruts en fonction de la profondeur .

N° éch.	Sondage	Etage	Profondeur (m)	Extrait total % de la roche	Extrait total mg/g de C.org.	HC Saturés % de l'extrait total	HC Aromati- ques % de l'extrait total	Composés polaires % de l'extrait total	Résines % de l'extrait total	Asphaltènes % de l'extrait total	Saturés/ Aromat.	Pristane/ Phytane	Prist./ nC17	Phyt./ nC18
6 16 18 19 22 29	SBAA-1	Tournaisien Strunien Givétien Givétien Silurien Silurien	502,80 644,80 1312,80 1316,80 1331,40 1417,60	0,761 0,100 0,347 0,253 0,174 0,152	884,88 46,95 62,75 504,20 116,00 101,33	51 21 30 24 46 50	19 28 29 23 17 17	30 52 42 53 37 33	28 39 30 45 31 27	2 13 12 8 6 6	2,65 0,75 1,03 1,04 2,71 2,94	0,89 1,88 1,92 1,92 1,65 1,70	0,41 0,46 0,27 0,28 0,30 0,18	0,27 0,29 0,16 0,15 0,20 0,12
60 69 72 74	SBAA-3	Tournaisien Frasnien Givétien Givétien	438,80 1289,80 1336,70 1342,20	0,151 0,144 0,313 0,407	129,06 105,88 57,54 76,79	51 44 32 31	13 27 27 29	36 29 41 40	30 20 30 28	6 9 11 12	3,92 1,63 1,19 1,07	1,45 1,81 1,73	0,80 0,25 0,28	0,53 0,19 0,20
132	SBAA-24	Tournaisien	638,60	0,300	441,18	41	16	43	39	4	2,55	1,28	0,50	0,30
54	AZMW-1	Famenien	1121,70	0,031	17,03	21	27	52	36	16	0,78	1,77	1,08	0,56
87 89	ODZ-1 ODZ-1	Strunien Silurien	1110,50 2107,30	0,051 0,041	23,29 10,82	26 21	28 47	46 32	33 24	13 8	0,93 0,45	1,78 1,09	0,42 0,32	0,24 0,36
93	OTLA-1	Silurien	1596,80	0,062	49,60	36	20	43	32	11	1,80	1,95	0,60	0,35
109 110	LTNW-1 LTNW-1	Strunien Strunien	1529,55 1533,55	0,035 0,038	9,51 14,96	12 13	37 40	51 47	33 39	18 8	0,32 0,33	1,44 2,29	0,42 0,47	0,20 0,22
116	LT-1	Famenien	1062,10	0,027	20,00	26	23	50	36	14	1,13	1,56	0,67	0,45

Tableau 7 Composition des extraits chloroformiques totaux des sédiments du bassin de Sbaa
(C.org. = Carbone Organique ; HC = hydrocarbures)

N° échant.	Sondage	Etage	Profondeur (m)	Extrait total % de la roche	Extrait total mg/g de C.org.	Asphaltènes % de l'extrait total
2 10 11	SBA-1	Tournaisien Strunien Tournaisien	421,20 569,00 570,50	0,031 0,029 0,073	43,06 29,29 48,67	22,54 20,60 23,69
66 76	SBA-3 SBA-3	Strunien Silurien	744,50 2049,00	0,061 0,008	33,15 15,38	15,45 -
129 130	SBA-2A SBA-2A	Tournaisien Tournaisien	522,20 528,60	0,050 0,071	48,54 88,75	- -
139 144	SBA-1 SBA-1	Tournaisien Tournaisien	614,00 734,70	0,016 0,020	17,20 22,22	- -
32 41 49	LN-1	Strunien Strunien Famennien	803,10 867,75 905,40	0,152 0,025 0,041	117,83 16,13 19,62	5,33 27,00 20,91
83 85	ODZ-1 ODZ-1	Tournaisien Tournaisien	764,25 813,10	0,085 0,037	92,39 22,56	12,89 11,57
99	LT-1	Tournaisien	1386,75	0,013	15,66	-
149	LT-2	-	1427,60	0,011	8,73	-

Tableau 8 : Teneur en extrait chloroformique total et en asphaltènes des sédiments du bassin de Sbaa .

N°	Sondage	Etage	Profondeur (m)	Extrait total % de KB	HC saturés % de l'ex- trait total	HC aromat. % de l'ex- trait total	Produits NSO % de l'ex- trait total
6	SBAA-1	Tournaisien Grès de SBAA	508,80	1,92	6	3	91
16	SBAA-1	Strunien	644,80	1,22	11	10	78
18	SBAA-1	Givétien	1312,80	1,23	12	1 ?	87 ?
22	SBAA-1	Silurien	1331,40	2,09	9	7	84
29	SBAA-1	Silurien	1417,60	1,48	35	11	54
60	SBAA-3	Viséen- Tournaisien	438,80	1,46	12	12	76
66	SBAA-3	Strunien	744,50	1,21	16	9	74
69	SBAA-3	Frasnien	1289,80	2,10	23	10	67
74	SBAA-3	Givétien	1342,20	2,07	8	5	87
129	SBAA-2A	Viséen- Tournaisien	522,20	0,42	18	11	71
132	SBAA-2A	Viséen- Tournaisien	638,60	3,14	4	2	93
94	OTLA-1	Silurien	1590,80	1,20	26	7	66
85	ODZ-1	Tournaisien	813,10	1,26	16	11	73
87	ODZ-1	Strunien	1110,50	1,37	14	11	75
89	ODZ-1	Silurien	2107,30	0,55	11	15	74
54	AZ.W'-1	Famenien	1121,70	1,01	17	7	76

Tableau 9 : Composition des extraits chloroformiques des kérogènes bruts (KB) des sédiments du bassin de SBA

• 11-2-3-2- Composition des extraits

a) Roches brutes

Seuls les extraits correspondants aux rendements les plus forts de chaque étage stratigraphique (18 échantillons sur 34) ont été analysés du point de vue de leur composition en hydrocarbures aliphatiques saturés, hydrocarbures aromatiques et composés polaires. Ces compositions sont représentées dans le tableau 7 et les figures 50 à 52.

Ces résultats permettent de distinguer les extraits du Tournaisien et du Silurien des extraits du Strunien et du Famennien. En effet, les extraits des deux premiers étages ont des teneurs plus fortes en hydrocarbures saturés (36 à 51 % de l'extrait total) et plus faibles en hydrocarbures aromatiques (13 à 19 % de l'extrait total) et en composés polaires (30 à 40 % de l'extrait total) que ceux du Strunien et du Famennien; les teneurs correspondantes de ces derniers extraits sont respectivement de 12 à 26 %, de 27 à 40 %, 46 à 52 %. Le Givétien paraît occuper une position intermédiaire (figure 52).

Nous retrouvons, dans le diagramme triangulaire représenté dans la figure 52, le chemin d'évolution thermique classique, avec du Silurien au Tournaisien un déplacement vers le pôle des hydrocarbures saturés.

Notons que l'échantillon n° 94 (Silurien du sondage OTLA-1) se singularise parmi les échantillons du même étage de la région nord du bassin par une proportion de composés polaires plus élevée (43 %) et une proportion d'hydrocarbures saturés plus faibles (36 %), ce qui indique sa relative immaturité.

b) Kérogènes

Les compositions des extraits chloroformiques des kérogènes bruts sont représentées dans le tableau 9. On constate que les composés polaires représentent l'essentiel de l'extrait de tous les échantillons (54 à 93 % en poids). Les proportions des hydrocarbures saturés et des hydrocarbures aromatiques semblent varier d'une manière aléatoire.

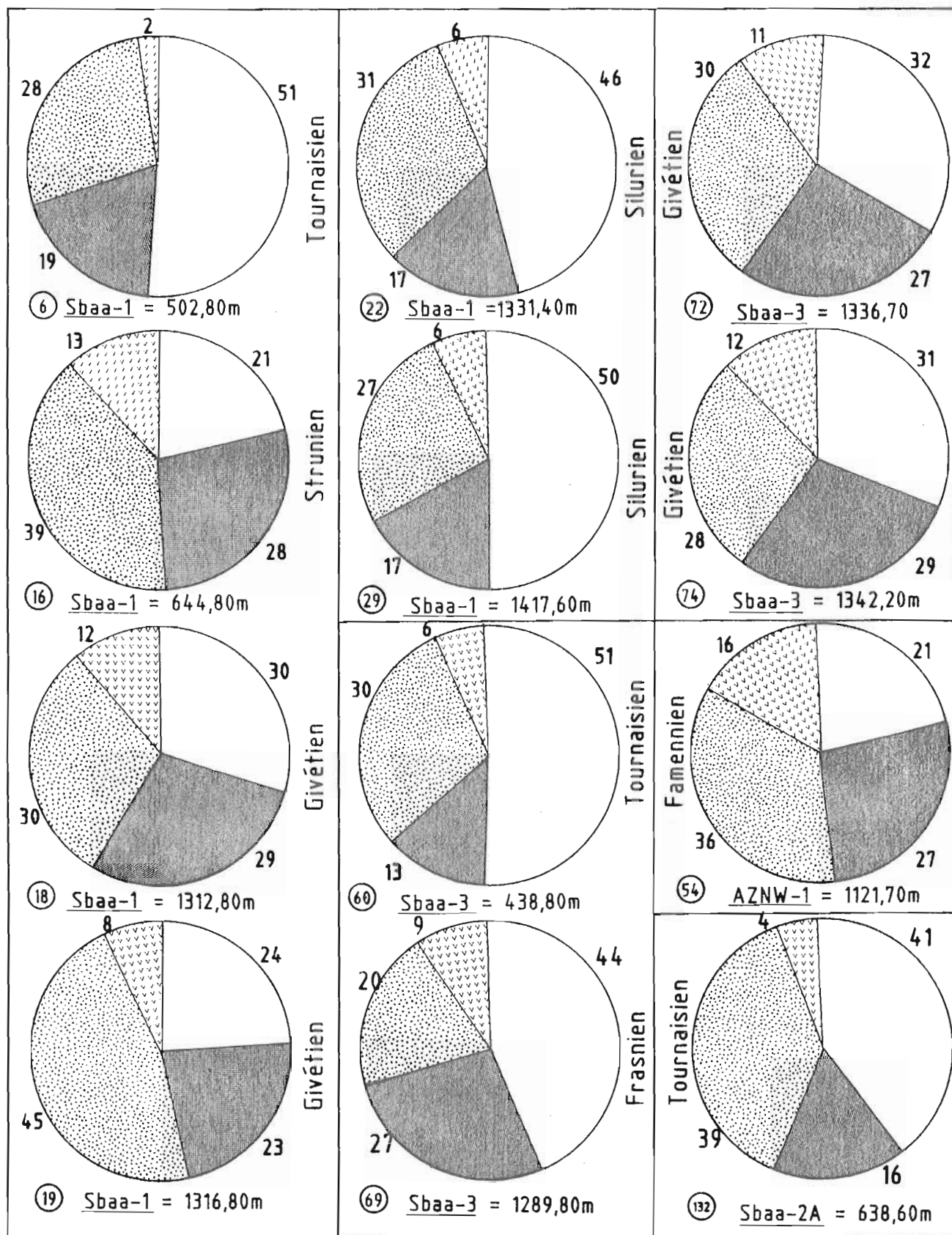


Figure 50 : Pourcentages pondéraux (rapportés au poids de l'extrait chloroformique total) des hydrocarbures saturés, des hydrocarbures aromatiques, des résines et des asphaltènes dans les sédiments du bassin de Sbaa (la légende est donnée dans la figure 51) .

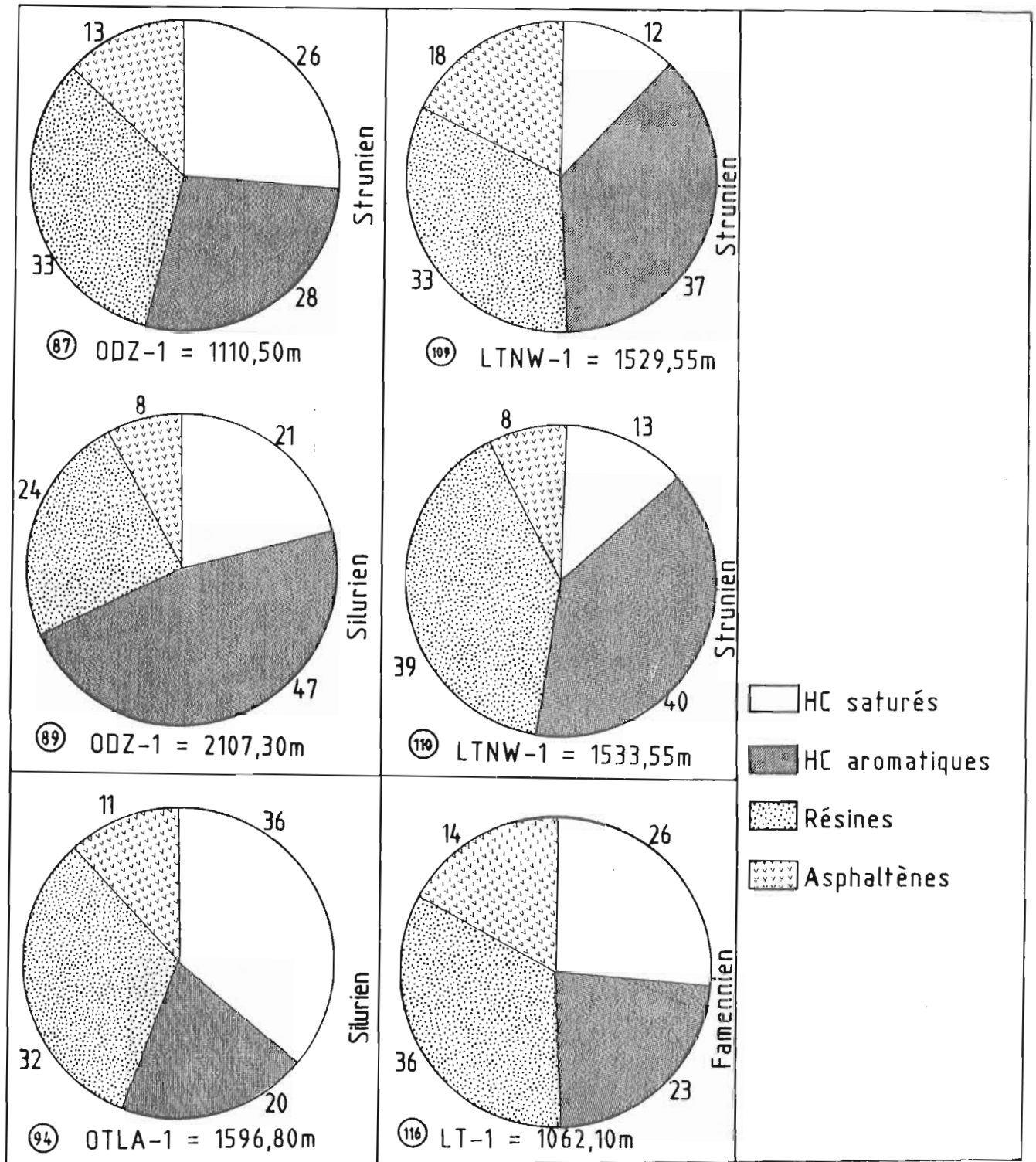


Figure 51 : Pourcentages pondéraux (rapportés au poids de l'extrait chloroformique total) des hydrocarbures saturés, des hydrocarbures aromatiques, des résines et des asphaltènes dans les sédiments du bassin de Sbaa .

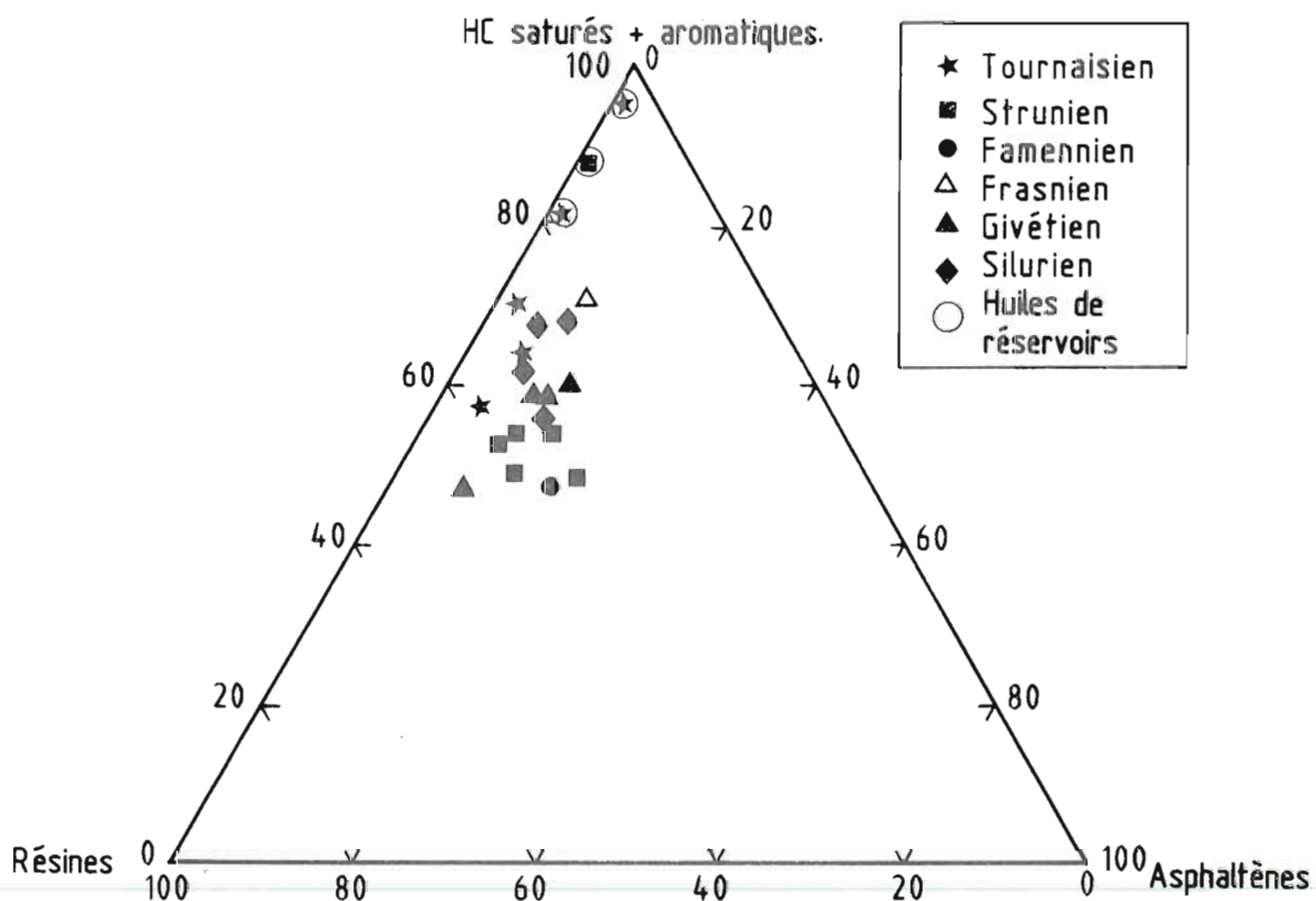
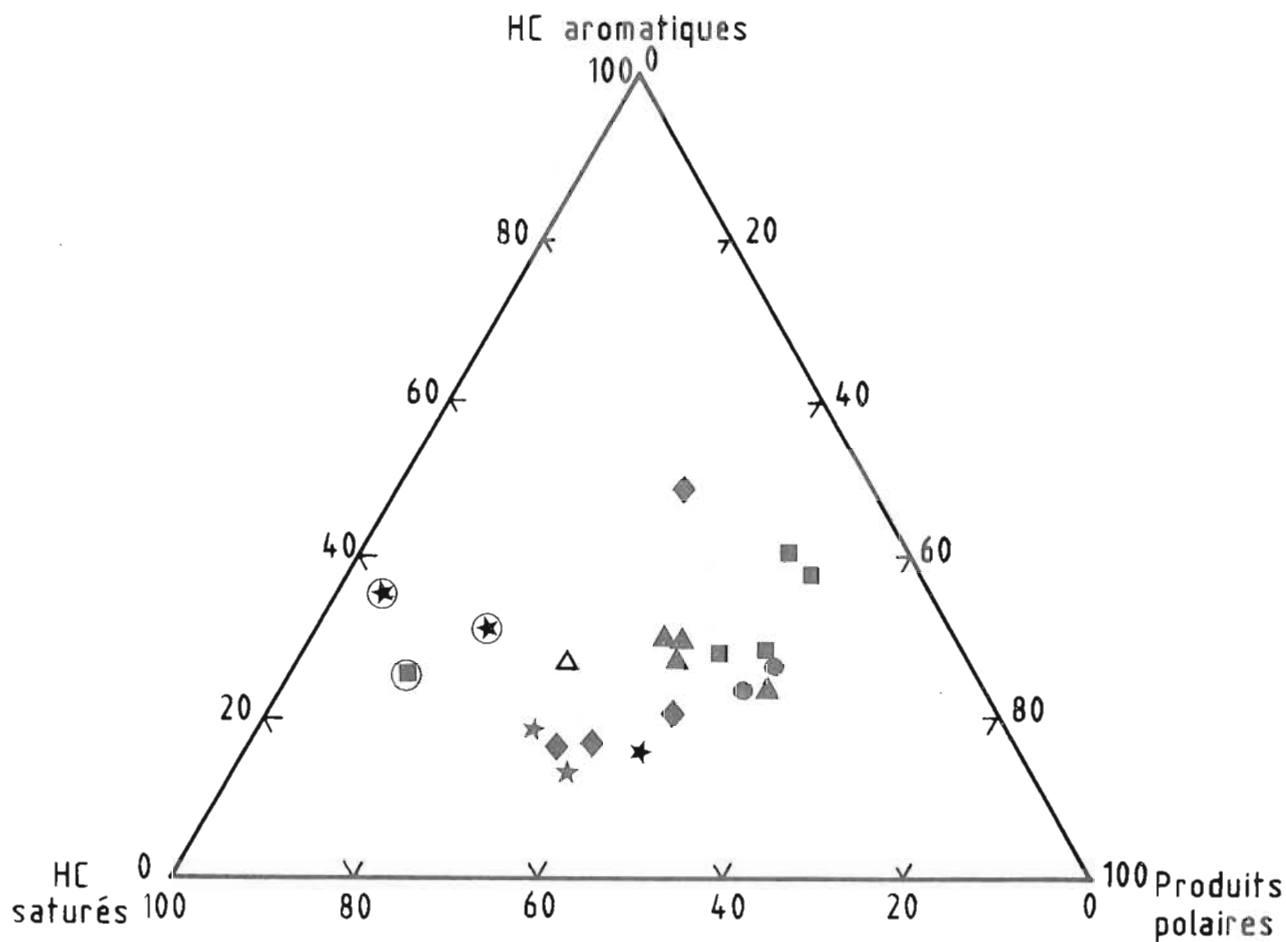


Figure 52 : Composition relative en hydrocarbures saturés, hydrocarbures aromatiques et produits polaires des extraits chloroformiques et des huiles de réservoirs des sédiments du bassin de Sbaa .

• 11-2-3-3- Distribution des n-alcanes

Les distributions des n-alcanes des échantillons étudiés, déduites de leurs chromatogrammes, sont représentées sur la figure 53, et les rapports pristane/phytane, pristane/nC17 et phytane/nC18 sont donnés dans le tableau 7.

Les observations suivantes peuvent en être tirées:

* seuls deux échantillons (n°109 et n°110, voir ci-dessous) présentent une prédominance des n-alcanes impairs. Tous les autres échantillons ne présentent aucune prédominance des pairs ou des impairs;

* l'abondance relative des n-alcanes diminue régulièrement avec l'augmentation du nombre de C;

* les rapports pristane/nC17 et phytane/nC18 sont inférieurs à 1 pour tous les échantillons;

* en ce qui concerne le Tournaisien, seuls deux échantillons (n°6 et n°132) ont été étudiés. Ils se caractérisent, d'une part, par un mode assez large au niveau de nC20-nC22, puis une décroissance progressive jusqu'à nC30, et, d'autre part, par de très faibles proportions relatives en isoprénoïdes (pristane et phytane);

* en ce qui concerne le Strunien, deux échantillons de la région nord du bassin (n°16 et n°87) et deux échantillons de la région sud (n°109 et n°110) ont été étudiés.

Les deux premiers échantillons se caractérisent par une distribution présentant un mode en nC17-nC18 suivie d'une décroissance rapide. Leurs rapports pristane/phytane sont plus élevés que ceux des échantillons du Tournaisien.

Les deux échantillons de la région sud proviennent d'un même sondage (LTNH-1) et ne sont espacés que de 4 m. Néanmoins, leurs distributions sont notablement différentes: celle de l'échantillon n°109 est assez similaire à celle des échantillons du Tournaisien (mode en nC20-nC22 et faible proportion relative en isoprénoïdes) avec toutefois une prédominance des impairs; celle

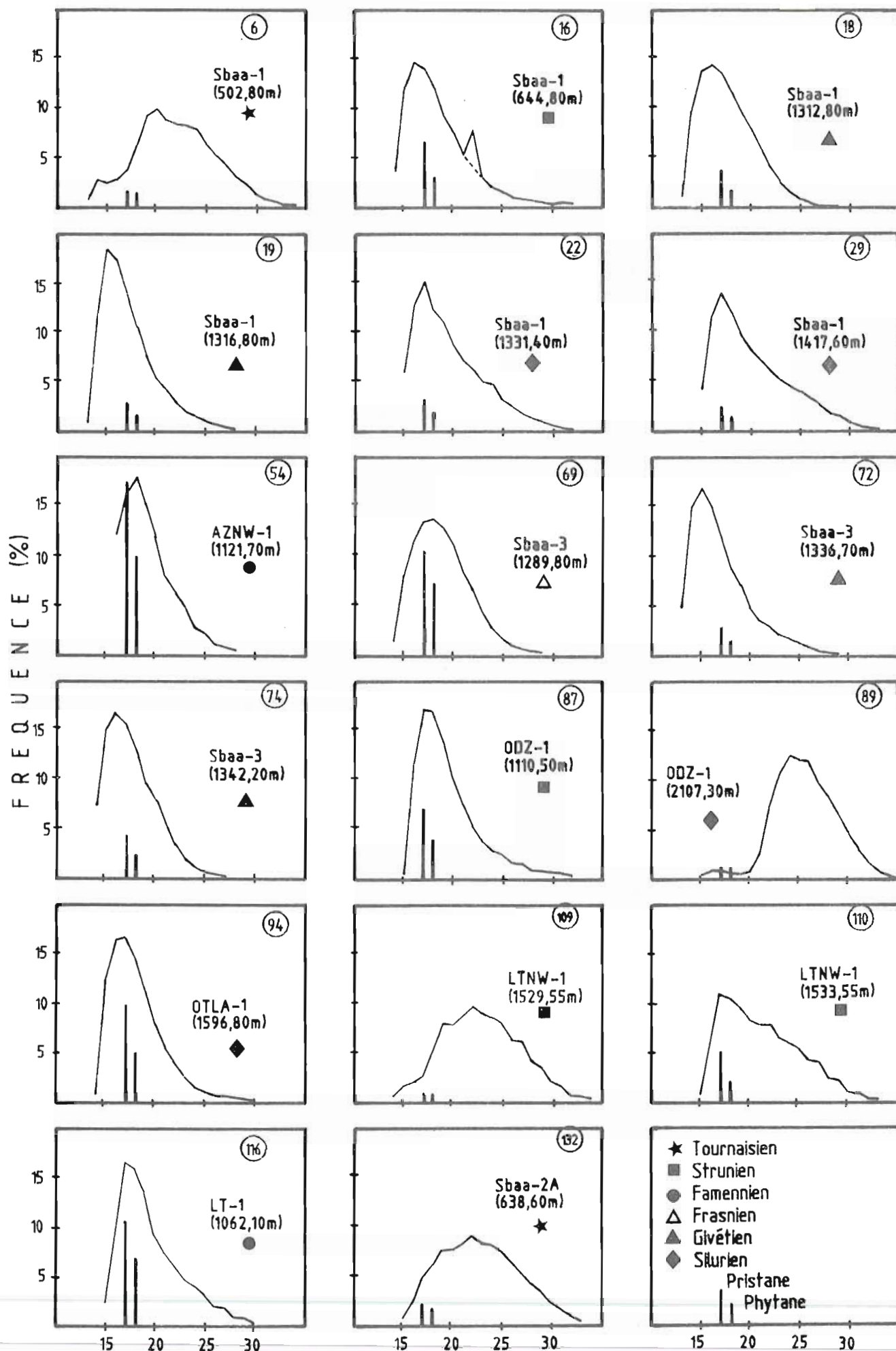


Figure 53 : Distribution quantitative des n-alcanes et des isoprénoides en fonction de leur nombre d'atomes de carbone dans les sédiments du bassin de Sbaa .

de l'échantillon n°110 est asymétrique avec un mode en C17 suivi d'une décroissance des n-alcanes, et également une faible prédominance des impairs. Ce dernier échantillon présente le rapport pristane/phytane le plus fort de l'ensemble des échantillons: 2,29;

* Famennien et Frasnien. Les échantillons de ces deux étages présentent des distributions similaires à celles des échantillons du Strunien de la région nord, avec cependant des proportions relatives en pristane et phytane plus élevées (les plus fortes de tous les échantillons). L'échantillon du Famennien (n°54) est le seul à posséder un rapport pristane/nC17 supérieur à 1;

* Givétien et Silurien. Les distributions des échantillons de ces étages présentent un mode étroit et accusé, avec un maximum en nC15 pour le Givétien et nC17 pour le Silurien suivi d'une décroissance relativement rapide avec la longueur de chaînes. Toutefois, un échantillon (n°89, correspondant à la base du Silurien du sondage 002-1) se distingue par une distribution présentant un mode en nC22-nC23 et des quantités relatives de n-alcanes inférieurs à nC20 insignifiantes.

Leurs rapports pristane/nC17 et phytane/nC18 sont relativement faibles à l'exception des échantillons n°89 et n°94 (Silurien).

Ces résultats appellent les commentaires suivants:

- Les échantillons du Tournaisien et, dans une moindre mesure, ceux du Strunien de la région sud, qui présentent des distributions caractérisées par des quantités significatives de n-alcanes lourds (jusqu'à nC25), pourraient correspondre à une matière organique enrichie en débris végétaux continentaux (Tissot et al., 1977). En ce qui concerne le Strunien, cette hypothèse est confortée par la prédominance des n-alcanes impairs (Tissot et al., 1977);

- les échantillons des autres étages (Famennien, Frasnien, Givétien et Silurien), qui présentent des distributions présentant un mode en nC15-nC17 suivi d'une décroissance rapide, correspondraient à une matière organique phytoplanctonique et d'algues benthiques (Winters et al., 1969; Blumer et al., 1971; Tissot et al., 1977).

III- MATIERE ORGANIQUE DES RESERVOIRS

Trois échantillons d'huile brute provenant des niveaux réservoirs du Tournaisien et du Strunien des sondages Sbaa-1 (Tournaisien), LT-1 (Strunien) et TOT-1 (Tournaisien/Strunien) ont été étudiés.

Seule la densité apparente de l'huile de TOT-1 a été mesurée ($d_{app}=0,80$), les deux autres huiles s'avérant trop visqueuses. Les pourcentages pondéraux de distillat sont respectivement 2, 29 et 32 % pour Sbaa-1, LT-1 et TOT-1.

Les pyrochromatogrammes des huiles brutes sont donnés dans la figure 54. Ils révèlent que la fraction C13- n'est présente que dans l'huile de TOT-1; les deux autres huiles ont dû perdre cette fraction à cause d'une mauvaise conservation.

III-1- Composition des huiles

Les phénomènes de migration entraînent des changements de composition entre l'extrait de la roche mère et l'huile accumulée correspondante (Tissot and Welte, 1978). Ceci est vérifié dans le cas des huiles étudiées (figures 52 et 55):

- * les hydrocarbures aliphatiques saturés en représentent, pour les trois échantillons, 50 à 60 % en poids, soit généralement beaucoup plus que dans les extraits de roches (voir paragraphe B-II-2-3-2);

- * elles sont également enrichies en hydrocarbures aromatiques par rapport aux extraits (voir paragraphe B-II-2-3-2);

- * elles ne contiennent que des traces d'asphaltènes.

C'est dans l'huile de Sbaa-1 que les pourcentages pondéraux de résines sont les plus forts (19 %) et ceux des saturés les plus faibles (50 %).

III-2- Distribution des n-alcane

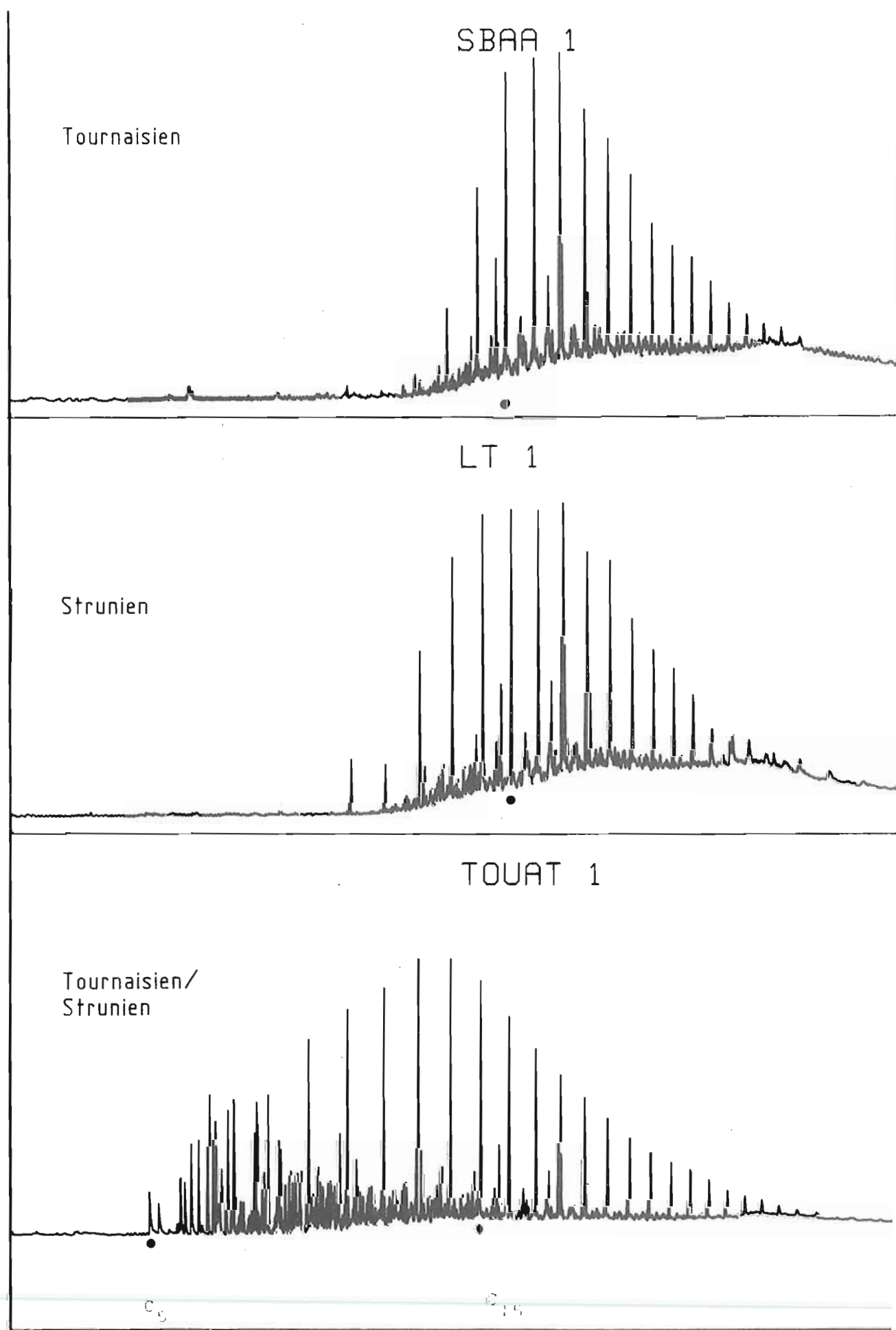


Figure 54 : Chromatogrammes des huiles brutes provenant de 3 niveaux réservoirs dans le bassin de Sbaa .

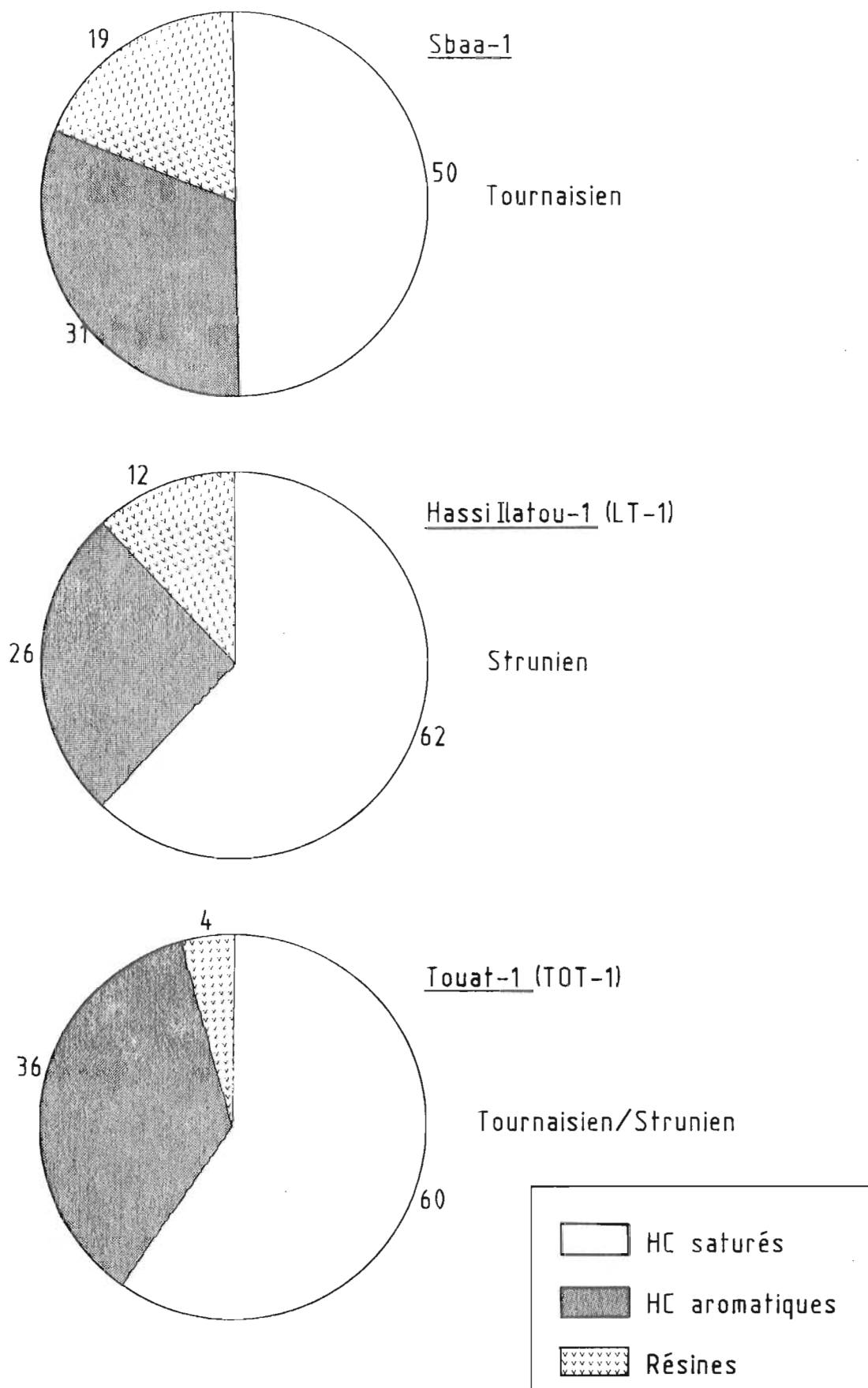


Figure 55 : Pourcentages pondéraux des hydrocarbures saturés, des hydrocarbures aromatiques et des résines dans la fraction > 210°C des huiles provenant de 3 niveaux réservoirs dans le bassin de Sbass.

Les chromatogrammes des hydrocarbures saturés et les distributions des n-alcanes et des isoprénoïdes correspondants sont donnés dans les figures 56 à 58.

Pour les trois échantillons étudiés, les n-alcanes présentent une distribution unimodale dominée par les homologues à courte chaîne (nC14-nC18), avec un maximum à nC17 pour Sbaa-1 et nC15-nC16 pour LT-1 et TOT-1.

Cette distribution des n-alcanes est caractéristique d'une matière organique d'origine phytoplanctonique et algale (voir paragraphe B-II-2-3-3 ci-dessus).

IV- ETUDE DES TASMANACÉES DU SILURIEN

Les Tasmanacées sont considérées comme étant des kystes de *Chlorophytes* *Prasinophycées* marines, unicellulaires et flagellées (Bignot, 1982). Elles existent en plus ou moins grande quantité depuis le Cambrien jusqu'à l'actuel (Châteauneuf et Reyre, 1974).

Dans le cas de l'échantillon du Silurien du sondage OTLA-1, le genre a été précisé par la palynologie: il s'agit de *Tasmanites* (voir paragraphe B-II-1-1-2); ce genre est, en effet, très répandu à l'époque silurienne (Combaz, 1980).

Le protocole analytique utilisé pour l'étude des Tasmanacées est présenté dans le paragraphe A-III.

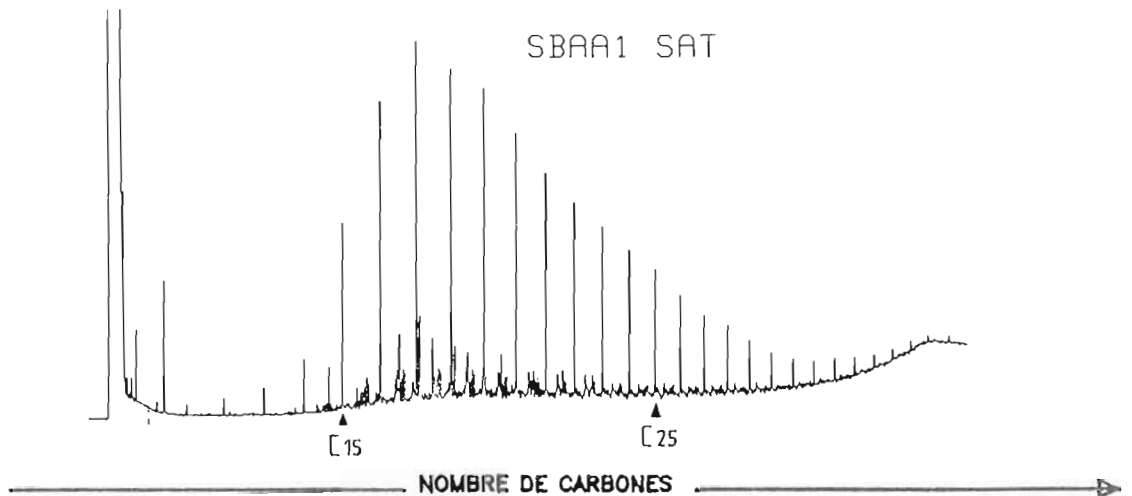
Le rendement de la séparation densimétrique du concentré de Tasmanacées est de 0,30 % environ.

- Les résultats de l'analyse élémentaire de cet échantillon avant et après pyrolyse sont donnés dans le tableau 10.

Les pourcentages pondéraux des éléments organiques de l'échantillon avant pyrolyse sont très élevés pour C, H et O et sont équivalents à ceux trouvés par Combaz (1980). Les rapports atomiques H/C et O/C positionnent l'échantillon entre les lignées I et II. Les fortes valeurs de H/C obtenues après pyrolyse ne sont pas significatives de l'évolution thermique normale; il s'agit probablement d'un artefact dû à la faible quantité analysée.

G.C. DES HYDROCARBURES SATURES

SBAA1 SAT

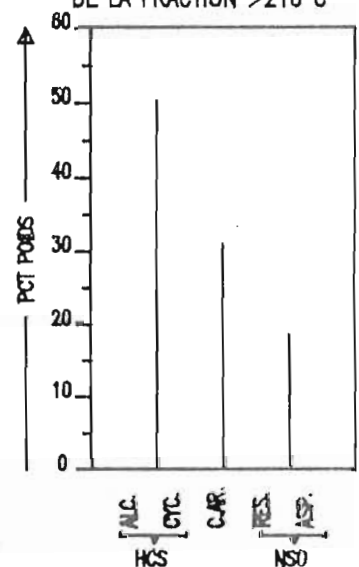
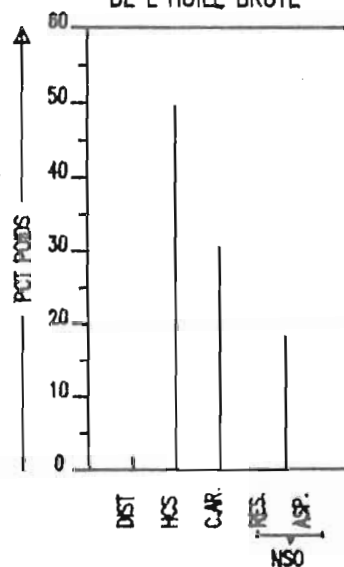


NOMBRE DE CARBONES

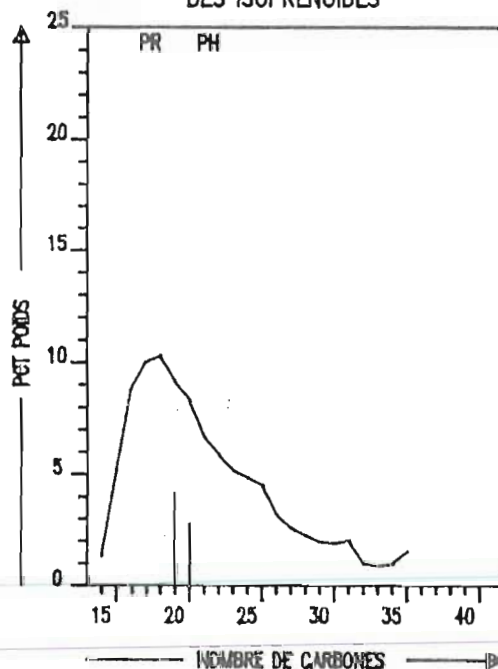
COMPOSITION
DE L'UILE BRUTE

COMPOSITION
DE LA FRACTION >210 C

BASSIN : SBAA
PUITS : Sbaa-1
COTE : 527/535m
ETAGE : Tournaisien
FORMATION : Grès de Sbaa



REPARTITION DES N ALCANES ET
DES ISOPRENOIDES



Pristane/Phytane = 1,50

Pristane/nC17 = 0,41

Phytane/nC18 = 0,27

NOMBRE DE CARBONES

Figure 56 : Composition de l'huile du sondage Sbaa-1 et résultats de la chromatographie gazeuse des HC saturés correspondants

G.C. DES HYDROCARBURES SATURES

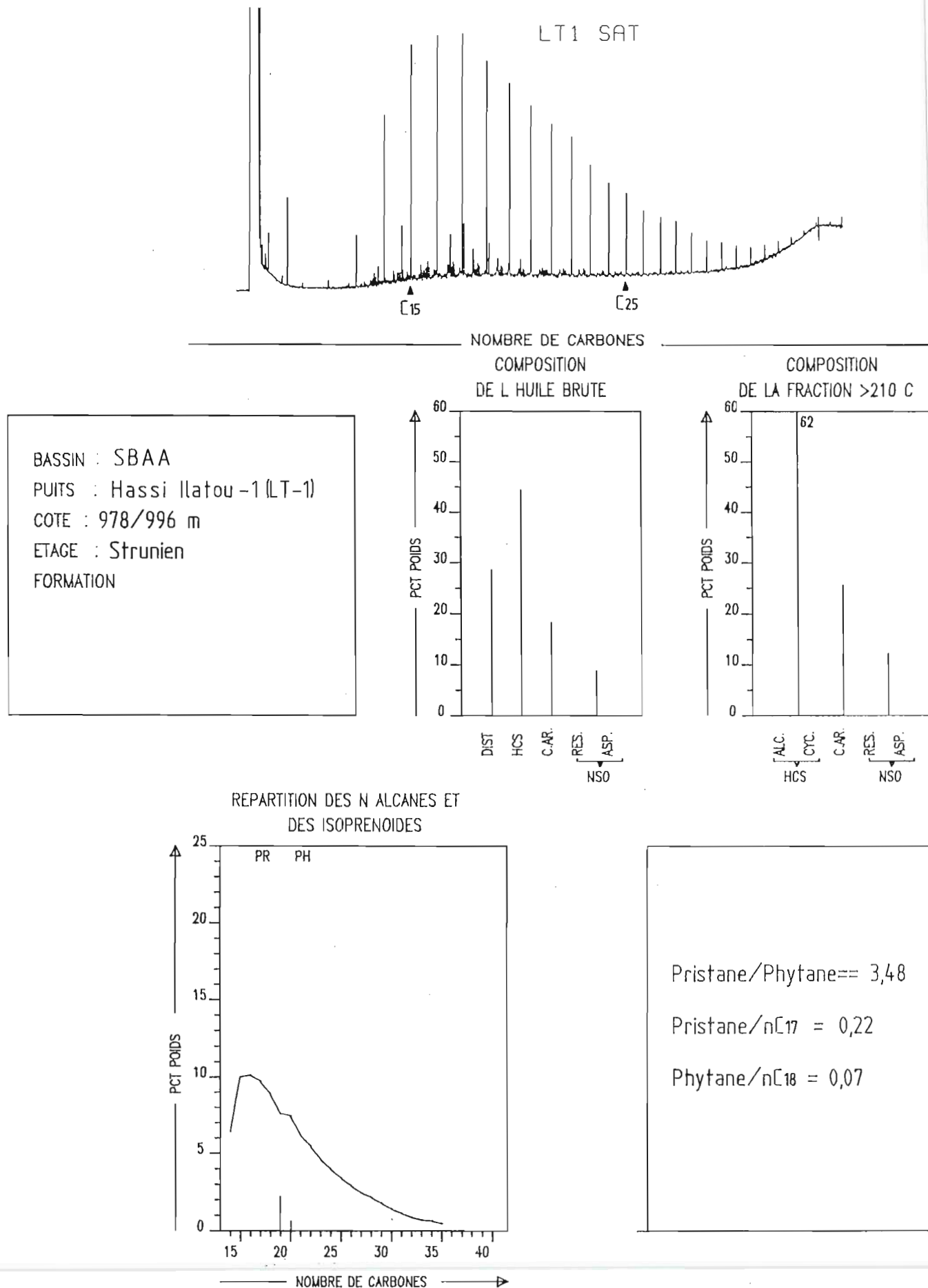
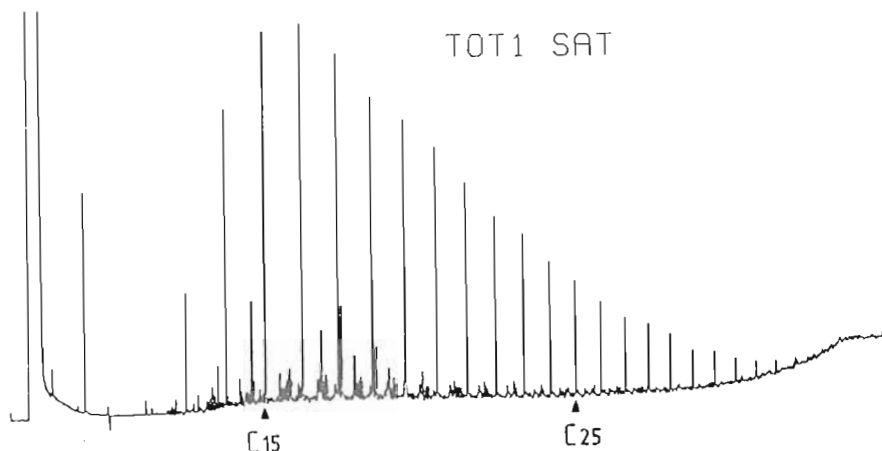


Figure 57 : Composition de l'huile du sondage LT-1 et résultats de la chromatographie gazeuse des HC saturés correspondants

G.C. DES HYDROCARBURES SATURES

TOT1 SAT



NOMBRE DE CARBONES

COMPOSITION
DE L'HUILE BRUTE

COMPOSITION

DE LA FRACTION >210 C

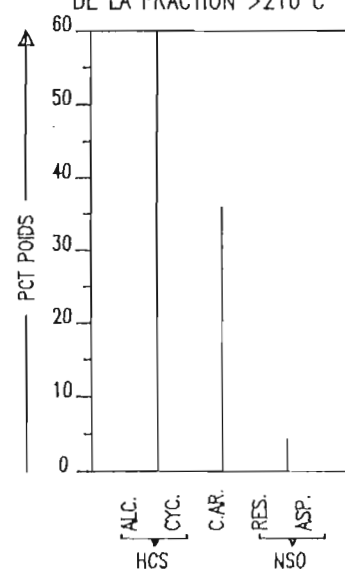
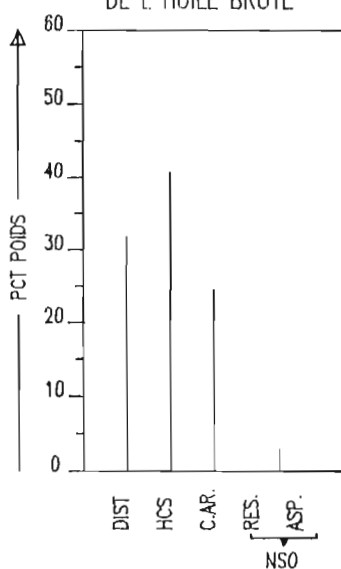
BASSIN : SBAA

PUITS : Touat-1 (TOT-1)

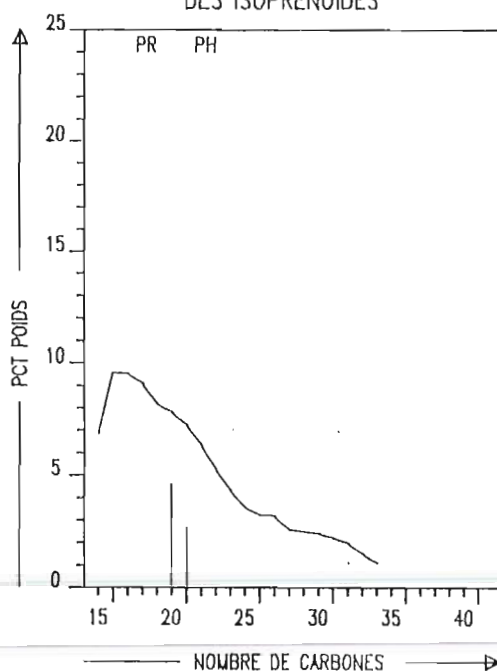
COTE : 555/588m

ETAGE : Tournaisien/Strunien

FORMATION



REPARTITION DES N ALCANES ET
DES ISOPRENOIDES



Pristane/Phytane = 1,72

Pristane/nC17 = 0,50

Phytane/nC18 = 0,32

Figure 58 : Composition de l'huile du sondage TOT-1 et résultats de la chromatographie gazeuse des HC saturés correspondants

	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)	S (%)	H/C	O/C	N/C	Cendres
Avant pyrolyse	74,73	9,52	8,57	1,64	-	1,53	0,09	0,02	2,96
Après pyrolyse	26,92	3,77	3,46	7,35	0,01	1,68	0,10	0,23	58,40

Tableau 10 : Résultats de l'analyse élémentaire du concentré de Tasmanacées du Silurien et du résidu solide récupéré après pyrolyse en milieu confiné de ces algues et extraction chloroformique.

C module %	S1 mg d'HC/gMOT	S2 mg d'HC/gMOT	S3 mg d'HC/gMOT	IH	IO	Tmax °C
68,15	30,20	723,20	8,80	1061	13	451

Tableau 11 : Résultats de la pyrolyse Rock-Eval du concentré de Tasmanacées du Silurien du sondage OTLA-1.

- L'index d'hydrogène (IH) obtenu par pyrolyse Rock-Eval est très élevé (1061 mg d'HC / g de C organique; voir tableau 11).

La valeur du Tmax trouvée (451° C) ne traduit vraisemblablement pas le degré de maturation réel de l'échantillon qui se trouve au début de la "fenêtre à huile" (voir paragraphe B-II-2-1-2 ci-dessus). Cette valeur serait à mettre en liaison avec la nature de l'échantillon.

Les énergies d'activation nécessaires au craquage thermique de ce matériel organique s'élèvent à 56 kcal / mole (figure 59). Elles sont équivalentes à celles trouvées pour le kénogène de référence du type I (Green River Shales).

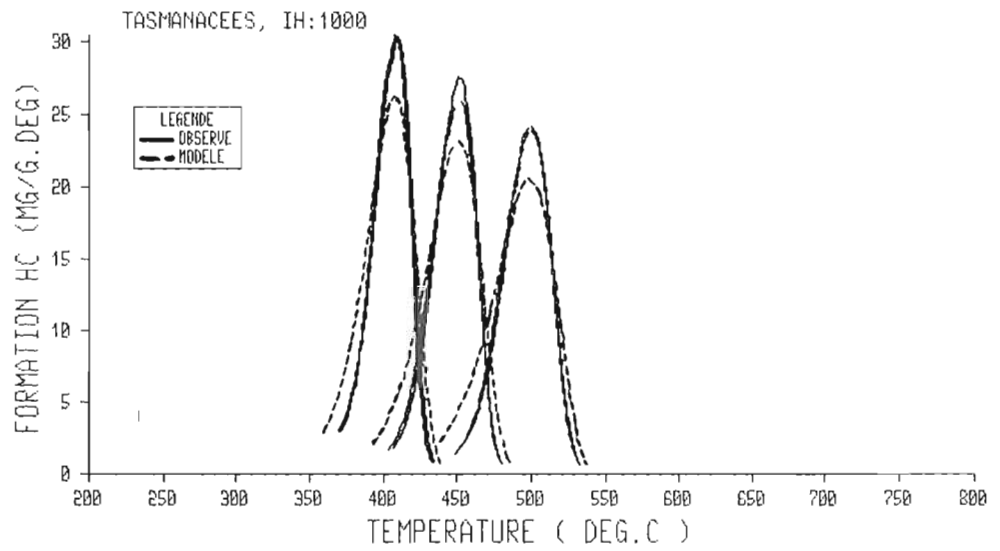
- Les résultats de la pyrolyse en milieu confiné sont donnés dans le tableau 12. Les produits totaux issus de cette pyrolyse (hydrocarbures + produits lourds) représentent 791 mg / g de matière organique totale initiale. Les pourcentages pondéraux des HC saturés, aromatiques et des produits polaires sont très comparables à ceux de la pyrolyse en milieu ouvert (tableau 13)

La distribution des n-alcanes issus de la pyrolyse en milieu fermé présente un mode en C18, caractéristique d'une matière organique algale, puis une diminution progressive jusqu'en C35 (figure 60). Cette distribution est similaire à celle des n-alcanes des huiles de réservoirs (figures 56 à 58).

- L'altération spectrale en microfluorimétrie effectuée sur le résidu solide de pyrolyse montre une évolution négative de l'intensité (notamment le paramètre Fb; voir figures 61 et 62). Ceci traduit la présence des hydrocarbures associés au résidu et non extraits par le chloroforme.

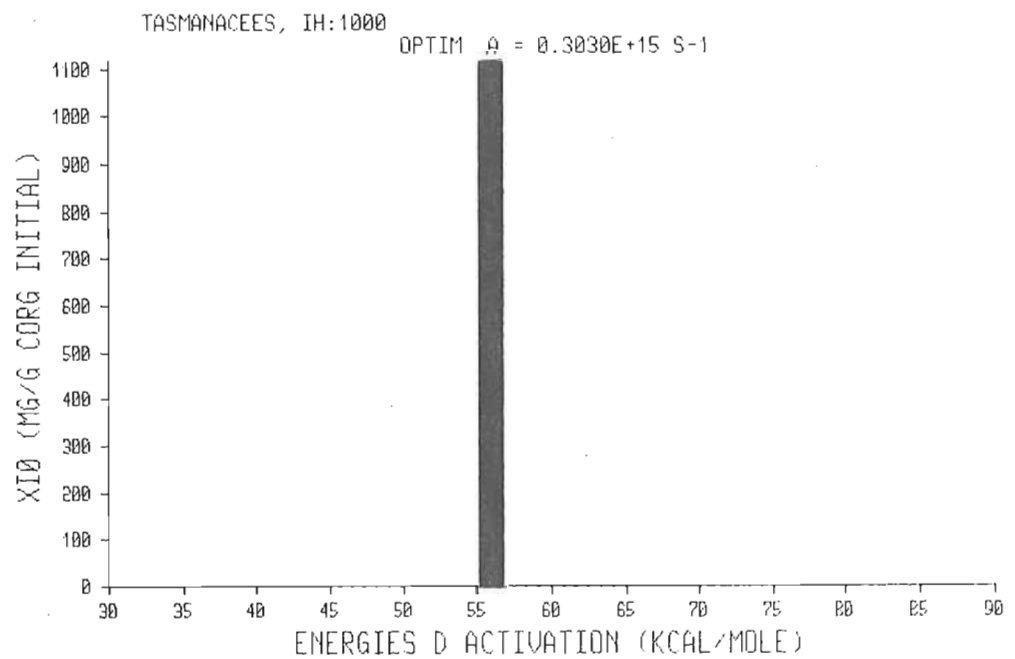
- L'observation de ce résidu solide en microscopie électronique à transmission montre que la matière carbonée se trouve au stade de mésophase et est associée à des argiles identifiées par diffraction optique: les plans des couches aromatiques s'orientent parallèlement à ceux des argiles.

Ainsi, l'apparition relativement précoce des stades de mésophase, compte tenu des conditions de maturation (322° C, 48 h, 80 MPa), serait liée au rôle de "catalyseur" des argiles servant ainsi de plan de dépôt et d'orientation à la matière carbonée.



Comparaison des courbes de pyrolyse observées et calculées par le modèle cinétique, des Tasmanacées du Silurien du bassin de Sbaa .

Fig. : 59



Distribution des énergies d'activation concernant le modèle cinétique, des Tasmanacées du Silurien du bassin de Sbaa

C1-C6	C6-C13	C13+							
mg/gMOT	mg/gMOT	HC saturés		HC aromatiques		Résines		Asphaltènes	
		%	mg/gMOT	%	mg/gMOT	%	mg/gMOT	%	mg/gMOT
91,27	47,79	10	61,21	26	163,70	33	214,32	33	212,86

Tableau 12 : Quantités (mg/g MOT initiale) et pourcentages pondéraux des différentes fractions issues de la pyrolyse en milieu confiné à l'isotherme 322°C pendant 48h.

R C15+ %	HC saturés % du pyrolysat	HC aromatiques % du pyrolysat	Produits NSO % du pyrolysat
55	12	23	65

Tableau 13 : Rendement en composés C15+ de la pyrolyse préparative. Composition du pyrolysat (R= rendement de la pyrolyse en composés C15+ par rapport au poids de la prise d'essai (%)).

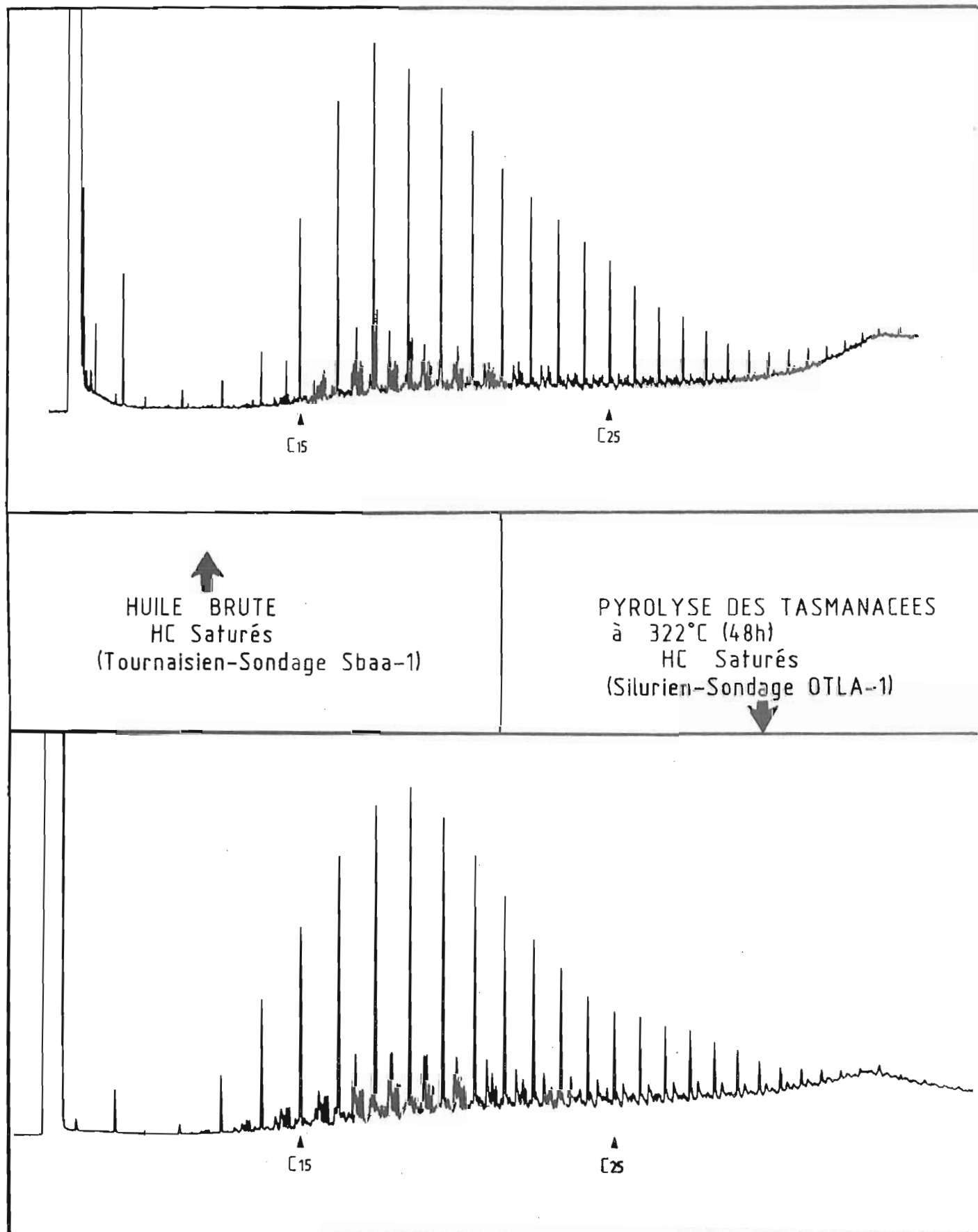
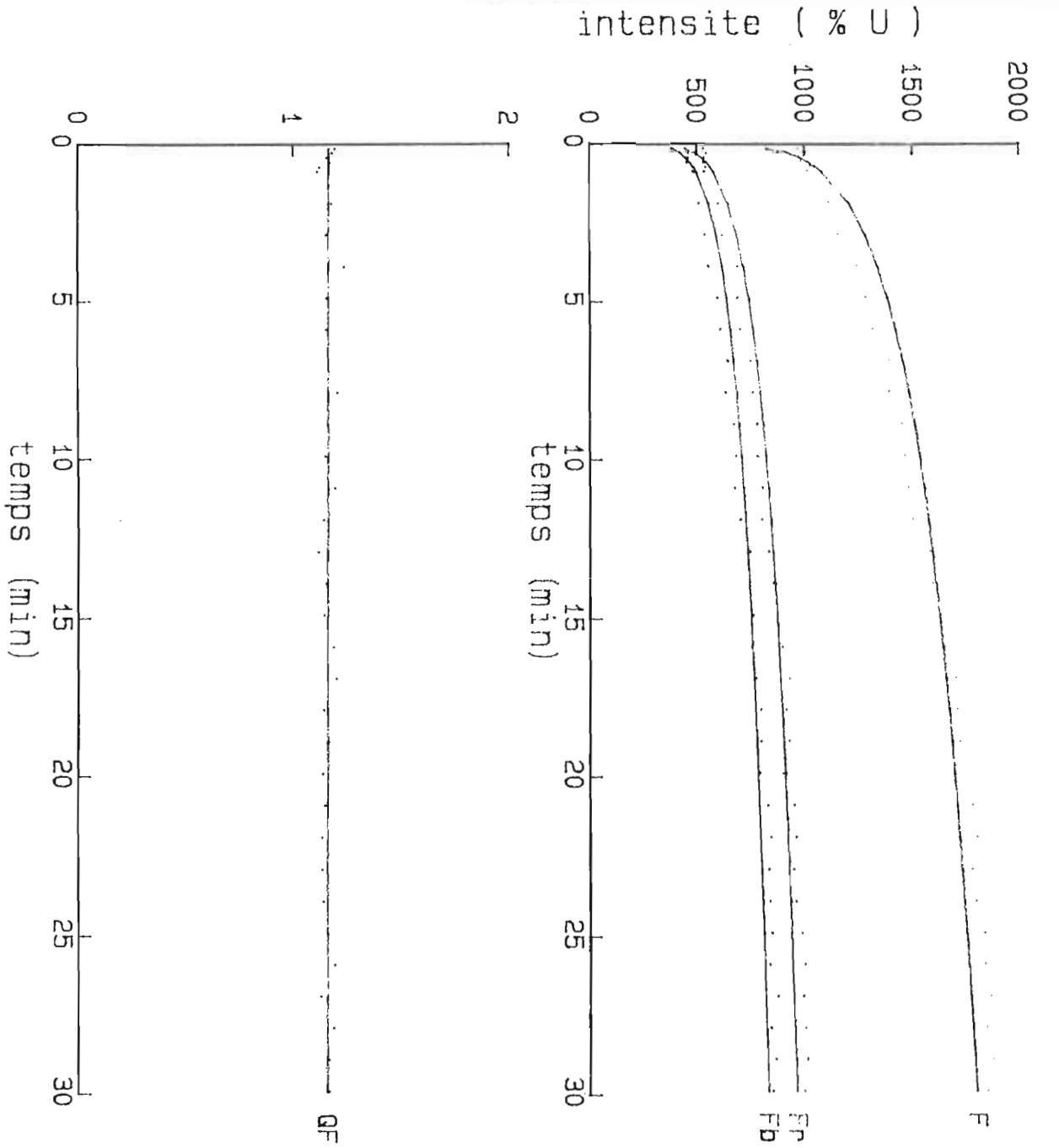


Figure 60 : Comparaison entre le chromatogramme des HC saturés d'une huile de réservoir (Tournaisien du sondage Sbaa-1) et le pyrogramme des HC saturés de Tasmanacées (Silurien du sondage OTLA-1)

Fig. 61 Alteration Spectrale (SS94TAST)



Parametres Fb
 $m = .148$
 $b = 275$
 $c.c = .967$

Parametres Fp
 $m = .147$
 $b = 322$
 $c.c = .965$

Objet = Tasmanacées du
 Silurien (Sondage OTLA-1)

Parametres QF
 $m = -.002$
 $b = 1.17$

Fig. 62 Alteration Spectrale (SS94TT)

Parametres Fb

m= -.072
b= 1109
c.c= -.924

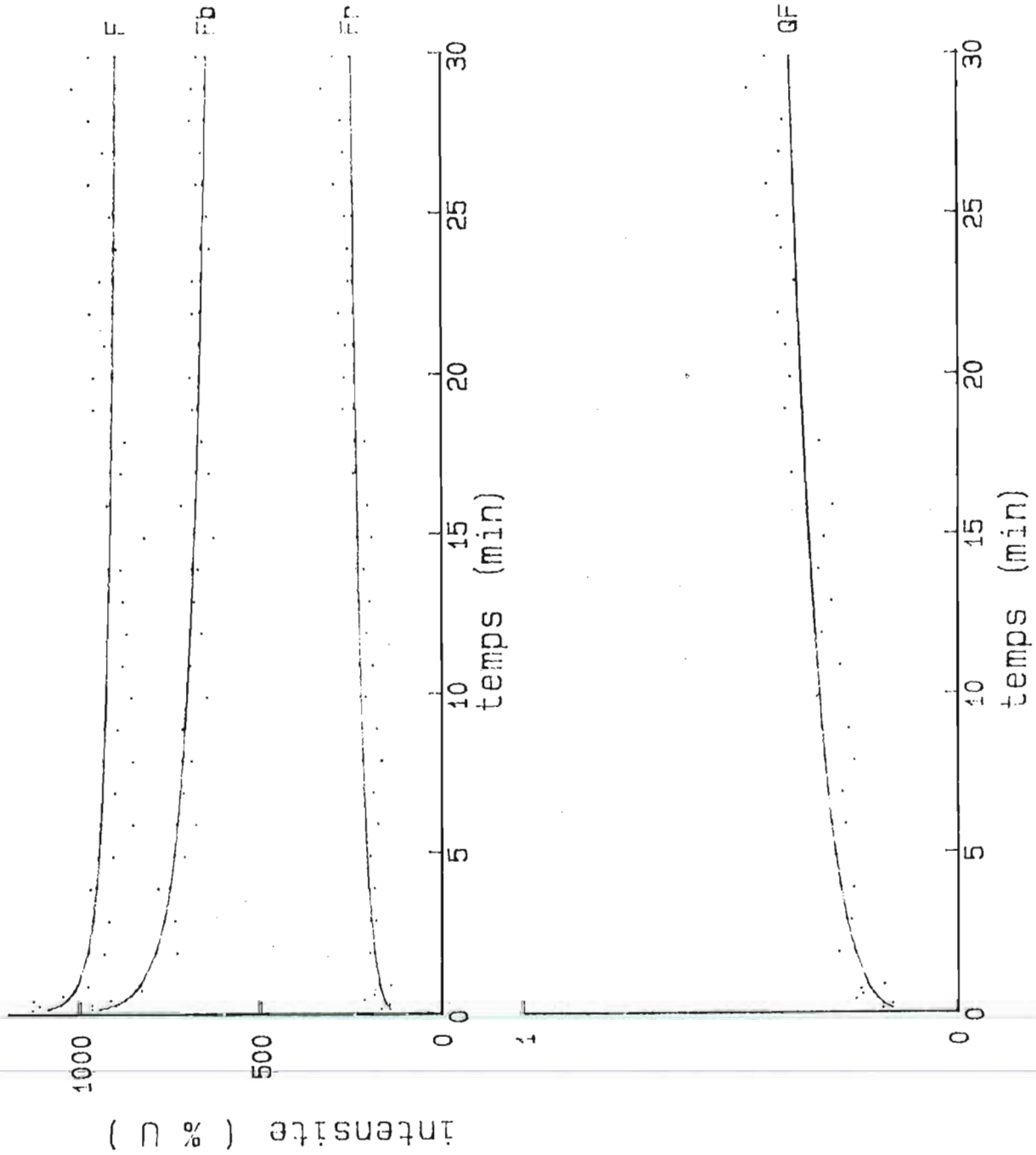
Parametres Fp

m= .106
b= 113
c.c= .723

Objet = Résidu solide de
pyrolyse en milieu confiné
à 322°C .

Parametres GF

m= .178
b= .101



QUATRIEME PARTIE

*SYNTHESE ET
INTERPRETATION
DES RESULTATS OBTENUS*

Avertissement. Pour ne pas affecter la lisibilité de cette synthèse, il n'a pas été fait de renvois systématiques aux résultats obtenus par les différentes méthodes et présentés dans le chapitre B de la Troisième partie.

1- ORIGINE ET DEGRE D'EVOLUTION DE LA MATIERE ORGANIQUE DU BASSIN DE SBAA

Cette synthèse suivra l'ordre logique d'une diagenèse thermique croissante, c'est à dire la séquence stratigraphique inverse.

• Tournaisien, Strunien et Famennien

Dans l'ensemble du bassin, ces trois étages contiennent une matière organique sédimentée en milieu marin, avec une influence continentale détritique assez prononcée. Cette influence est décroissante du Tournaisien au Famennien.

Le caractère marin nous est indiqué notamment par la présence d'Algues Tasmanacées et de quelques Acritarches. L'influence continentale se traduit par une assez large proportion d'inerto-détrinite, de spores, ainsi que de débris charbonneux remaniés. Du point de vue géochimique, les résultats de pyrolyse Rock-Eval et de pyrolyse-CPG font apparaître un caractère mixte (continental et marin).

Dans la région nord, les valeurs de Tmax situent le Tournaisien avant la zone à huile (415 à 430°C), le Strunien et le Famennien au tout début de cette même zone (430 à 440°C). Il est à noter que la teneur en extrait des roches est importante dans quelques niveaux du Tournaisien, vraisemblablement en raison de la présence d'hydrocarbures allochtones, certains de ces niveaux étant d'ailleurs des réservoirs productifs. L'évolution des paramètres de fluorescence mesurés sur les Tasmanacées situent le Tournaisien légèrement avant la zone mature des Algues, et le Strunien et Famennien au début de cette même zone. Il existe donc une certaine concordance entre la maturité de l'ensemble du cortège organique et celle des seules Algues Tasmanacées.

Dans la région sud, la composition des extraits révélerait un Strunien légèrement plus immature.

• Givétien et Silurien

Dans ces deux étages, la matière organique est plus nettement d'origine marine que dans les niveaux supérieurs. Les méthodes optiques ont révélé une large prédominance d'un matériel planctonique marin, constitué surtout de Tasmanacées, d'Acritharques et de Chitinozoaires. Le Silurien se distingue, notamment dans la région sud, en ne contenant presque exclusivement que des Tasmanacées. Les résultats géochimiques confirment la prépondérance du caractère marin de ce matériel en le situant franchement sur la lignée II.

Les échantillons les moins évolués appartiennent au sommet du Silurien de la région sud et se situent au début de la catagenèse (le Givétien n'ayant pas été étudié dans cette région). Ce caractère peu mature par rapport aux échantillons de la région nord ne se traduit pas dans les valeurs de Tmax (comprises entre 440 et 445 °C); par contre, il est confirmé par les résultats de la microfluorimétrie des Tasmanacées ainsi que par les valeurs d'Index d'Hydrogène. Ces dernières sont de l'ordre de 700 mg HC / g CO dans la région sud, contre environ 350 mg HC / g CO dans la région nord.

Les échantillons les plus évolués appartiennent à la base du Silurien de la région nord (l'équivalent dans la région sud n'a pas été carotté), avec des Tmax d'environ 455°C et des Index d'Hydrogène de l'ordre de 10 mg HC / g CO. Ces valeurs les situent en fin de catagenèse.

II- LOCALISATION DES ROCHES MÈRES EFFECTIVES ET CORRELATION
AVEC LES HUILES DE RESERVOIRS

La comparaison entre la composition qualitative des huiles (produites) de réservoirs (Tournaisien et Strunien), et celle des extraits de roches révèle une corrélation entre ces huiles et les matières organiques du Silurien.

Les caractères communs à ces compositions sont la prédominance des

hydrocarbures aliphatiques saturés et une distribution unimodale des n-alcanes dominée par les homologues à courtes chaînes (C15-C18). Il est à noter que les extraits des réservoirs du Tournaisien, bien qu'ils soient également dominés par les hydrocarbures saturés, présentent une distribution des n-alcanes différente. Celle-ci témoigne vraisemblablement du caractère autochtone d'une partie de l'extrait, soumis à l'influence continentale observée dans le Tournaisien et le Strunien.

D'autre part, les pyrolyses (en milieu ouvert et fermé) réalisées sur les Tasmanacées du Silurien immature (région sud), ont également révélé une composition très similaire à celles des huiles de réservoirs.

Sur le plan quantitatif, le potentiel en hydrocarbures des niveaux immatures du Silurien est de l'ordre de 8 kg HC / tonne de roche. Par ailleurs, les données de pyrochromatographie nous indiquent qu'environ 85 % de cette quantité, soit 6,8 kg HC / tonne de roche, sont des effluents liquides (C6+).

Même si ce potentiel chimique en huile représente un maximum possible (la pyrolyse ouverte provoquant peu de réactions de craquage secondaire), il est très supérieur à ceux du Tournaisien, du Strunien et du Famennien (entre 0,4 et 3,2 kg HC / tonne de roche).

Seul le Givétien de la zone nord, peu mature, présente des potentiels équivalents, voire supérieurs à ceux du Silurien (jusqu'à 22 kg HC / tonne de roche, dont environ 75 % d'effluents liquides).

Si l'on ajoute à ces considérations qualitatives et quantitatives le fait que seul le Silurien de la région nord est franchement mature (jusqu'en fin de catagenèse à sa base), il apparaît comme la principale roche mère effective du bassin. Cette conclusion est renforcée par le fait qu'à son sommet, le Silurien de cette région a déjà produit 40 % de son potentiel (environ 3,5 kg HC / tonne de roche dans les niveaux matures de la région nord, comparé à environ 8 kg HC / tonne de roche dans les niveaux immatures de la région sud), et qu'il est lithologiquement homogène et présent sur une épaisseur notable (400 m en moyenne).

La similarité de composition des extraits des roches mères et des huiles de réservoirs incite à penser que l'expulsion des hydrocarbures a suivi de peu leur génération. Les données et l'échantillonnage dont nous disposons ne nous ont pas permis de proposer des hypothèses concernant les voies de la migration secondaire.

Enfin, il apparaît que le Givétien de la région nord et le Silurien en général sont les roches mères potentielles du bassin.

III- HYPOTHESES SUR L'AGE DES HYDROCARBURES FORMES

L'individualisation du bassin de Sbaa, ainsi que sa structuration, se sont produites à la phase paroxysmique du cycle hercynien. Cette phase a donc probablement été à l'origine de la formation des pièges structuraux contenant actuellement des hydrocarbures. L'accumulation de ceux-ci est donc vraisemblablement post-Hercynienne et se poursuivrait à l'heure actuelle. Ceci n'exclut pas cependant que des hydrocarbures aient pu être formés, mais non accumulés, au cours des périodes anté-Hercyniennes.

Toutefois, les courbes d'enfouissement reconstituées indiquent que la base du Silurien se situait à moins de 2000 m à la fin du Paléozoïque. D'autre part, il est peu probable que les paléogradients géothermiques aient été radicalement modifiés au-delà de cette période (en raison d'une activité tectonique faible), et ils sont vraisemblablement restés conformes au gradient géothermique actuel - 35°C / km environ - (Escale et al., 1968).

Ceci indique que le Silurien n'a pu produire des quantités significatives d'huile avant la fin du Paléozoïque.

CONCLUSION GENERALE

Les principaux résultats apportés par ce travail et permettant de progresser dans la compréhension de la diagenèse organique dans le bassin de Sbaa peuvent se résumer ainsi :

- la roche mère effective de ce bassin est le Silurien dans sa partie nord. La production de quantités significatives d'huile n'a probablement pas eu lieu avant la fin du Paléozoïque. L'expulsion de ces hydrocarbures a dû avoir lieu peu de temps après leur génération. La phase paroxysmique du cycle hercynien est vraisemblablement à l'origine de la formation des pièges structuraux permettant leur accumulation au sein du Tournaisien ("Grès de Sbaa") et du Strunien; cette accumulation se poursuivrait à l'heure actuelle.

- les roches mères potentielles de ce bassin sont le Givétien dans sa partie nord et le Silurien en général.

Par ailleurs, ce travail a permis de confirmer certains résultats de travaux effectués en microspectrofluorimétrie dans le laboratoire d'accueil (Unité de Recherche en Pétrologie Organique):

(1) la corrélation existant entre la diminution du paramètre QF-535 des Tasmanacées et l'augmentation des teneurs en extrait chloroformique des sédiments correspondants;

(2) la corrélation existant entre la diminution du paramètre QF-535 des Tasmanacées et l'enrichissement des extraits des sédiments correspondants en hydrocarbures aliphatiques saturés.

Ces résultats de microspectrofluorimétrie sont résumés dans la figure 18.

Enfin, la similitude des pyrochromatogrammes respectifs du concentré de Tasmanacées du Silurien de ce bassin et de l'huile accumulée au niveau du Tournaisien ("Grès de Sbaa") du sondage Sbaa-1 (figure 60) a permis de mettre en évidence la participation notable de ces Algues à la formation de ces hydrocarbures (et par conséquent de confirmer l'identité de la roche mère, comme il est indiqué ci-dessus).

Notons pour terminer que, comme nous l'avons souligné à plusieurs reprises, il a manqué à ce travail l'apport de données géologiques fondamentales comme la stratigraphie précise des terrains étudiés et le schéma structural actuel du bassin, données qui auraient permis de reconstituer l'évolution paléogéographique et l'histoire tectonique de cette région.

Il va de soi que les résultats pétrologiques et géochimiques de ce travail ne pourront être appliqués à l'exploration pétrolière dans cette partie du Sahara que s'ils sont replacés dans un contexte géologique bien défini.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

• ALIMEN H., LE MAITRE D., MENCHIKOFF N., PETTER G. et POUEYTO R. (1952)
Les Chaînes d'Ouganda et la Saoura.
Actes du XIXème Congrès Géologique International, Alger, 1952. Monographies
régionales, 1ère série, n°15, 76-81.

• ALLAN J., BURRY M. and DOUGLAS H.G. (1980)
A geochemical study of the exinite group maceral alginite, selected from three
permian-carboniferous torbarnites.
Adv. in Org. Geochem. 1979, A.G. Douglas and S.R. Maxwell (eds). Pergamon,
1980, London, 599-618.

• ALPERN B. (1967)
Quelques applications géologiques du pouvoir réflecteur des charbons.
Communication présentée au Colloque International "Le charbon en tant que
roche et matière première", Freiberg, 2-4 octobre 1967. Document intérieur
CERCHAR, n°1768.

• ALPERN B. (1980)
Pétrographie du kérogène.
In "Kerogen", B. Durand (ed.). Technip, Paris, 339-383.

• ALPERN B. et CHEYMOL D. (1978)
Réflectance et fluorescence des organoclastes du Toarcien du bassin de Paris
en fonction de la profondeur et de la température.
Rev. Inst. Fr. du Pétrole, vol.XXXIII, n°4, 515-535.

• ALPERT N.L., KEISER W.E. and SZYMANSKI H.A. (1970)
Theory and practise of infrared spectroscopy.
Plenum Press, New York.

• ANONYME (1984)
Synthèse de la Cuvette de Sbaa. Etude géologique - Problèmes pétroliers.
Rapport Sonatrach, 35 p.

• BARTENSTEIN H. et TEICHMÜLLER R. (1974)
Les études de houillification, outil de prospection des hydrocarbures
paléozoïques.
In "Houillification et pétrole", Fortschr. Geol. Rheinland Westfalen, 1974,
t.24, 159-202. Traduit de l'allemand par P. Robert, Document B.R.G.M. n°5477.

- BEHAR F. et LEBLOND C. (1984)

Fractionnements rapides par chromatographie liquide préparative d'huile et d'extrait de roche.

Note technique interne, Institut Français du Pétrole, 5 p.

- BEHAR F. and PELET R. (1985)

Characterization of asphaltenes by pyrolysis and chromatography.

J. Anal. Appl. Pyro., 7, 121-135.

- BEHAR F. and PELET R. (1985)

Pyrolysis-Gas chromatography applied to organic geochemistry: structural similarities between kerogens and asphaltenes from related rock extracts and oils.

J. Anal. Appl. Pyro., 8, 173-187.

- BEHAR F. et VANDENBROUCKE M. (1986)

Représentation chimique de la structure des kéroènes et des asphaltènes en fonction de leur origine et de leur degré d'évolution.

Rev. Inst. Fr. du Pétrole, vol. XLI, n°2, 173-188.

- BERTRAND P. (1986)

Pétrologie organique et hydrocarbures.

Mémoire de thèse de Doctorat ès Sciences, Université d'Orléans, 133 p.

- BERTRAND P., PITTION J.-L. and BERNAUD C. (1986)

Fluorescence of sedimentary organic matter in relation to its chemical composition.

Adv. in Org. Geochem. 1985, 641-647.

- BERTRAND P., MARTINEZ L. and PRADIER B. (à paraître)

The microspectrofluorimetry applied to the localization of hydrocarbons in source rocks microstructures.

In "Migration of hydrocarbons in sedimentary basins", I.F.P. Research Conferences on Exploration, Bordeaux, June 15-19, 1987.

- BERTRAND P., MARTINEZ L., PRADIER B., LAGGOUN F., HUC A.Y. and PITTION J.-L. (à paraître)

Thermal maturity assessment in organic petrology: a comparison between reflectance and fluorescence based on case studies of sedimentary basins.

Soumis à l'Am. Ass. Petr. Geol. Bull.

- BEUF S., BIJU-DUVAL B., STEVAUX J. et KULBICKI G. (1956)

Ampleur des glaciations "siluriennes" au Sahara: leurs influences et leurs conséquences sur la sédimentation.

Rev. Inst. Fr. du Pétrole, vol.XXI, n°3, 362-381.

- BEUF S., BIJU-DUVAL B., DE CHARPAL O., ROGNON P., GARIEL O. et BENNACEF A. (1971)

Les grès du Paléozoïque inférieur au Sahara. Sédimentation et discontinuité. Evolution structurale d'un craton.

Publications de l'Institut Français du Pétrole. Collection "Science et technique du Pétrole", n°18, Technip, Paris, 459 p.

- BIGNOT G. (1982)

Les microfossiles. Les différents groupes. Exploitation paléobiologique et géologique.

Dunod, Paris, 211 p.

- BLUMER M., GUILLARD R.R.L. and CHASE T. (1971)

Hydrocarbons of marine phytoplankton.

Marine Biology, vol. 8, 183-189.

- CASTEX H. (1985)

Résines et asphaltènes: évolution en fonction des types de matière organique et de leur enfouissement.

Rev. Inst. Fr. du Pétrole, vol.XL, n°2, 169-189.

- CHATEAUNEUF J.-J. et REYRE Y. (1974)

Eléments de palynologie. Applications géologiques.

Laboratoire de Paléontologie de l'Université de Genève, 345 p.

- COMBAZ A. (1980)

Les kéroènes vus au microscope.

In "Kerogen", B. Durand (ed.). Technip, Paris, 55-87.

- DURAND B. (1980)

Sedimentary organic matter and kerogen. Definition and quantitative importance of kerogen.

In "Kerogen", B. Durand (ed.). Technip, Paris, 13-33.

- DURAND B. et ESPITALIE J. (1973)
Evolution de la matière organique au cours de l'enfouissement des sédiments.
C. R. Acad. Sci. Paris, Sér. D, 276, 2253-2256.
- DURAND B. and MONIN J.-C. (1980)
Elemental analysis of kerogens (C,H,O,N,S,Fe).
In "Kerogen", B. Durand (ed.). Technip, Paris, 113-141.
- DURAND B. and NICAISE G. (1980)
Procedures for kerogen isolation.
In "Kerogen", B. Durand (ed.). Technip, Paris, 35-52.
- DURAND B. and BERTRAND P. (à paraître)
Geochemical relationship between petroleum and coal.
Communication à "The A.A.P.G. Conference Fossil Fuels of Europe", Genève,
16-18 juillet 1984.
- ESCALE M., FARGUES P. et LEROY M. (1968)
Gradient géothermique du Sahara.
Chambre syndicale Rech. Prod. Pétrole, Paris, 2p.
- ESPITALIE J., DURAND B., ROUSSEL J.-C. et SOURON C. (1973)
Etude de la matière organique insoluble (kérogène) des argiles du Toarcien du
bassin de Paris: II. Etudes en spectroscopie infrarouge, en analyse thermique
différentielle et en analyse thermogravimétrique.
Rev. Inst. Fr. du Pétrole, vol. XXVII, 865-884.
- ESPITALIE J., LAPORTE J.-L., MADEC M., MARQUIS F., LEPLAT P., PAULET J.
et BOUTEFEU A. (1977)
Méthode rapide de caractérisation des roches mères, de leur potentiel
pétrolier et de leur degré d'évolution.
Rev. Inst. Fr. du Pétrole, vol. XXXII, n°1, 23-41.
- ESPITALIE J., DEROU G. et MARQUIS F. (1985 a)
La pyrolyse Rock-Eval et ses applications.
Rev. Inst. Fr. du Pétrole, vol. XL, n°5, 563-579.
- ESPITALIE J., DEROU G. et MARQUIS F. (1985 b)
La pyrolyse Rock-Eval et ses applications.
Rev. Inst. Fr. du Pétrole, vol. XL, n°6, 755-784.

- ESPITALIE J., DEROU G. et MARQUIS F. (1986)
La pyrolyse Rock-Eval et ses applications.
Rev. Inst. Fr. du Pétrole, vol.XLI, n°1, 73-89.
- FORSMAN J.P. and HUNT J.M. (1958)
Habitat of oil.
L.G. Weeks (ed.). A.R.P.G., 747.
- HOFFMANN E. und JENKNER A. (1932)
Die Inkohlung und ihre Erkennung in Mikrobild.
Glückauf, 68, 81-88.
- HUC A.Y., ROUCACHE J., BERNON M., CAILLET G. et DA SILVA M. (1976)
Application de la chromatographie sur couche mince à l'étude quantitative et qualitative des extraits de roches et des huiles.
Rev. Inst. Fr. du Pétrole, vol.XXXI, n°1, 67-98.
- LANZONI E. et MAGLOIRE L. (1969)
Associations palynologiques et leurs applications stratigraphiques dans le Dévonien supérieur et Carbonifère inférieur du Grand Eng Occidental (Sahara algérien).
Rev. Inst. Fr. du Pétrole, vol.XXIV, n°4, 441-468.
- Lexique International de Pétrographie des Charbons.
Ed. C.N.R.S., 1963.
1er supplément, 1971; 2ème supplément, 1975.
- MARTINEZ L., PRADIER B. et BERTRAND P. (1987)
La microspectrofluorimétrie en pétrologie organique. Méthodologie et application à l'étude de la maturation des Algues fossiles du Toarcien du Bassin de Paris.
C. R. Acad. Sci. Paris, 304, Sér.III, n°9, 441-446.
- MONIN J.-C. (1987)
Simulation expérimentale de la genèse et de la migration..Etat d'avancement au 31 décembre 1986.
Rapport interne, Inst. Fr. du Pétrole, Réf. 35140, 23p.
- MONIN J.-C., PELET R. et FEVRIER A. (1978)
Analyse géochimique de la matière organique extraite des roches sédimentaires.
IV. Extraction des roches en faibles quantités.
Rev. Inst. Fr. du Pétrole, vol. XXXIII, n°2, 223-240.

- OBERLIN A. (1979)

Application of darkfield electron microscopy to carbon study.
Carbon, 40, 7-20.

- OTTENJANN K. (1980)

Spektrale Fluoreszenz-Mikrophotometrie von Kohlen und Ölschiefen.
Leitz-Mitt. Wiss. u. Techn., 7, 262-272.

- OTTENJANN K., TEICHMÜLLER M. and WOLF M. (1975)

Spectral fluorescence measurements of sporinites in reflected light and their applicability for coalification studies.
Colloque International "Pétrographie organique et potentiel pétrolier",
C.N.R.S., Paris, 15-17 septembre 1973, 49-65.

- PELET R., BEHAR F. and MONIN J.-C. (1986)

Resins and asphaltenes in the generation and migration of petroleum.
Adv. in Org. Geochem. 1985, 481-497.

- PERRODON A. (1985)

Géodynamique pétrolière. Genèse et répartition des gisements d'hydrocarbures.
Masson, Paris, 380 p., 2ème édition.

- PRADIER B., MARTINEZ L., BERTRAND P. et PITTION J.-L. (1987)

Etude de la diagenèse organique dans le bassin de la Mahakam (Indonésie) par les méthodes microfluorimétriques.
C. R. Acad. Sci. Paris, 304, Sér.II, n°18, 1145-1150.

- PRICE L.C. and BARKER C.E. (1985)

Suppression of vitrinite reflectance in amorphous rich kerogen. A major unrecognized problem.
J. Petrol. Geol., 8, 1, 59-84.

- RAO C.N.R. (1963)

Chemical applications of infrared spectroscopy.
Academic press, New-York, 67p.

- ROBERT P. (1971)

Etude pétrographique des matières organiques insolubles par la mesure de leur pouvoir réflecteur. Contribution à l'exploration pétrolière et à la connaissance des bassins sédimentaires.
Rev. Inst. Fr. du Pétrole, vol.XXVI, n°2, 105-135.

• ROBERT P. (1976)

Approche de la géothermie des séries sédimentaires par l'étude de la diagenèse organique: relations avec la tectonique profonde de l'écorce.
Bull. Centre Rech. Pau -SNPA, 10, 271-285.

• ROBERT P. (1979)

Classification des matières organiques en fluorescence. Application aux roches mères pétrolières.
Bull. Centres Rech.Explor.-Prod. Elf-Aquitaine, 3, 1, 223-263.

• ROBERT P. (1985)

Histoire géothermique et diagenèse organique.
Bull. Centres Rech. Explor.-Prod. Elf-Aquitaine, Mém. 8, Pau, 341 p.

• ROBIN P. (1975)

Caractérisation des kérogènes et de leur évolution par spectroscopie infrarouge.
Mémoire de Thèse de Doctorat en Sciences Naturelles Appliquées, Université Catholique de Louvain, 162p.

• ROBIN P.L., ROUXHET P.G. et DURAND B. (1977)

Caractérisation des kérogènes et de leur évolution par spectroscopie infrarouge: fonctions hydrocarbonées.
Adv. in Org. Geochem. 1975, B. Campos et J. Goni (eds). ENADIMSA, 1977, Madrid, 693-716.

• SCOLARI G. et LILLE R. (1973)

Nomenclature et classification des roches sédimentaires (Roches détritiques terrigènes et roches carbonatées).
Bull. B.R.G.M., section IV, n°2, 127 p.

• SOLOMON P.R. and MIKNIS F.P. (1980)

Use of Fourier Transform infrared spectroscopy for determining oil shale properties.
Fuel, vol. 59, 893-896.

• TEICHMÜLLER M. (1958)

Métamorphisme du charbon et prospection du pétrole.
Rev. Industr. Minér., numéro spécial, Paris, 99-113.

• TEICHMÜLLER M. (1982)

Application of coal petrological methods in geology including oil and gas prospecting.
"Coal petrology", E. Stach (ed.). Gebrüder Borntraeger, Berlin.

- TEICHMÜLLER M. and DURAND B. (1983)

Fluorescence microscopical rank studies on liptinites and vitrinites in peat and coals and comparison with results of the Rock-Eval pyrolysis.
Int. J. Coal Geology, 2, 197-230.

- TISSOT B., DURAND B., ESPITALIE J. and COMBAZ A. (1974)

Influence of nature and diagenesis of organic matter in formation of petroleum.
Am. Ass. Petr. Geol. Bull., vol.58, n°3, March, 449-506.

- TISSOT B. et ESPITALIE J. (1975)

L'évolution thermique de la matière organique des sédiments: application d'une simulation mathématique.
Rev. Inst. Fr. du Pétrole, vol.XXX, n°5, 743-777.

- TISSOT B., PELET R., ROUCACHE J. et COMBAZ A. (1977)

Utilisation des alcanes comme fossiles géochimiques indicateurs des environnements géologiques.
Adv. in Org. Geochem. 1975, R. Campos and J. Goni (eds). E.N.A.D.I.M., Madrid, 117-154.

- TISSOT B.P. and WELTE D.H. (1978)

Petroleum Formation and Occurrence.
Springer Verlag, Berlin, 538p.

- UNGERER P. (1987)

Notice d'utilisation du programme OPTIM (ajustement des paramètres cinétiques du modèle de formation des hydrocarbures).
Rapport interne, Inst. Fr. du Pétrole, Projet n° B4190013, 27p.

- VAN GIJZEL (1967)

Autofluorescence of fossil pollen and spores with special references to age determination and coalification.
Leidse Geologische Mededelingen, deel 40, 263-317.

- VAN KREVELEN D.W. (1981)

Coal: Typology, Chemistry, Physics, Constitution.
Elsevier, Amsterdam, 514 p.

- WINTERS K., PARKER P.L. and VAN BRALEN C. (1969)

Hydrocarbons of Blue-green Algae: geochemical significance.
Science, vol. 163, 467-468.

- ZERIZER S. (1981)

Histoire géologique et géométrie des corps sédimentaires du Carbonifère de la cuvette de Sbaa.
Mémoire de fin d'études, I.A.P./ SONATRACH, 30 p.

ANNEXES

ANNEXE I : LOGS DE FORAGE

(ETABLIS D'APRES LES DOCUMENTS SONATRACH)

B

C

D

E

LEGENDE des logs stratigraphiques

- A** Nom du sondage
- B** Emplacement (●) des échantillons
- C** Profondeur (en mètres)
- D** Colonne stratigraphique

Cr	CRETACE SUPERIEUR
Co	"CONTINENTAL INTERCALAIRE"
J	JURASSIQUE
N	NAMURIEN
V	VISEEN
T	TOURNAISIEN
St	STRUNNIEN
Fa	FAMENNIEN
Fr	FRASNIEN
G	GIVETIEN
Si	SILURIEN
O	ORDOVICIEN
Ca	CAMBRIEN

- ### **[E]** Description Lithologique

S B A A-1

		Co	Sable hétérogène friable à ciment argilo-ferrugineux dolomitique avec des passées d'argile silto-sableuse tendre et quelques lits de calcaire blanchâtre.
	317,5	J	Alternance d'argile verdâtre et de grès fin friable à ciment argilo-dolomitique pyriteux avec quelques bancs de dolomie microcristalline.
	397,0		Argile sombre silto-micacée à pyrite et des passées de grès clair assez fin friable.
1 (416,5) 1b (419,2) 2 (421,2) 2b (456,6) 3 (459,6) 4 (464,0) 4b (465,0) 4c (467,5)	499,0	T3	"Grès de Sbâa": grès blanc fin micacé légèrement carbonaté glauconieux.
5 (471,5) 6 (502,8) 6b (513,0) 6c (525,0)	540,0 570,0	T2	Alternance de grès et d'argile foncée silto-micacée.
7 (536,0) 8 (540,6) 8b (544,6) 9 (547,8) 10 (569,0) 11 (570,5) 12 (629,8) 13 (634,5) 14 (637,8) 15 (641,8) 16 (644,8)	604,0 638,0 647,0	T1	"Grès de Sbâa": grès clair et argile micacée avec un peu de pyrite.
		23	Argile grise silto-micacée.
		St 1	Grès argilo-compact.
			Argile silteuse micacée à pyrite et quelques passées très fines et peu de calcaire.
	828,0		
		Fa	Argile grise silto-micacée à pyrite légèrement dolomitique.

17 (1309,0)
 18 (1312,8)
 19 (1316,8)
 20 (1319,5)
 21 (1328,8)
 22 (1331,4)
 23 (1335,8)
 24 (1337,5)
 25 (1407,6)
 26 (1411,8)
 27 (1412,9)
 28 (1414,9)
 29 (1417,6)
 30 (1421,5)
 31 (1424,4)

1082,0

1127,0

1153,0

1301,0

1329,0

1640,0

3

2

Fr1

G

Si

Siltstone grise avec traces de calcaire cristallin.

Argile grise micacée à passées de calcaire clair à fossiles.

Argile assez foncée riche en fossiles.
Peu de calcaire cristallin.

Calcaire cristallin avec passées argileuses fossilifères.

Argile sombre silteuse avec des passées gréseuses fines et de calcaire blanc cristallin.

S B A A - N1

		Co	Sable incolore moyen à grossier sub-arrondis passant à des grès rouges à jaunâtres à ciment argilo-ferrugineux plus ou moins carbonaté, friable avec passées d'argile verte beige, rouge silteuse à silto-sableuse, tendre, présence de calcaire blanchâtre.
	367,0 ?	J	Argile multicolore beige-rougeâtre, silteuse à silto-sableuse avec intercalations de silt et de siltstone brun-rouge dur. Traces de calcaire blanchâtre.
	436,0 ?	V	Argile grise parfois gris foncé localement gris vert rarement brun-rouge, tendre, silto-sableuse légèrement dolomitique, avec fines passées de grès gris-blanc fin à moyen sub-arrondi à ciment argilo-dolomitique. Présence de dolomie grise à beige cristalline; de galets de silex, de nodule de pyrite à la base (551-560 m).
135 (551,00)	565,0	+	Grès gris blanc à gris-brun parfois blanc fin à moyen sub-arrondi, légèrement friable à ciment argilo-siliceux à argilo-dolomitique avec inclusions de nodules de pyrite et de fossiles; stratification entrecroisée. Fines passées d'argile gris foncé à verdâtre.
136 (559,00)	628,0	T	Argile gris foncé à noire, indurée, silteuse, micacée avec passées de grès gris-blanc à gris-brun, compact, dur, parfois friable à ciment silico-argileux à argilo-dolomitique et de siltstone gris-blanc à gris-brun. Présence de pyrite.
137 (582,40)	722,0	st	"Grès de Sbâa": grès gris clair à blanc parfois gris brun, fin à moyen, dur à argileux à ciment silico-argileux localement dolomitique avec passées centimétriques à décimétriques d'argile gris-noir, silteuse, pyriteuse.
138 (592,30)	775,0		Alternance d'argile gris-noir, silteuse, micacée, feuilletée, indurée et de siltstone gris-foncé à blanc, micacé, compact avec passées de grès gris clair à blanc fin et très fin silico-argileux.
139 (608,80)	826,0		
140 (610,80)			
141 (614,00)			
142 (615,00)			
143 (618,50)			
144 (621,00)			
145 (622,00)			
146 (734,70)			
147 (737,80)			

S B A A-2-A

			Sable incolore moyen à grossier sub-arrondi, passant à des grès rouge à jaunâtre à ciment argilo-ferrugineux plus ou moins carbonaté, avec passées d'argile multicolore, verte, beige, rouge, silteuse à silto-sableuse, tendre et de calcaire plus ou moins dolomitique blanchâtre.
		Co	
	297,0	?	Alternances d'argile multicolore verte à brune, parfois rougeâtre et de grès blanc très fin friable à ciment argilo-carbonaté passant à des siltstones argileux avec rares et fines passées de dolomie gris-verdâtre.
	343,0	J	
			Argile grise à gris foncé, silteuse légèrement micacée, indurée, feuilletée avec rares passées de grès gris-blanc fin à moyen à ciment siliceux à silico-argileux.
	500,0	V	
126 (514, 20)			Grès gris-blanc, fin à moyen localement pyriteux et glauconieux passant parfois à un complexe argilo-gréseux avec des passées d'argile gris foncée silteuse, micacée, indurée
127 (518, 00)	550,0	+	
128 (520, 20)			Grès gris-blanc, fin à très fin, localement moyen à ciment siliceux à silico-argileux passant à siltstones gris foncé, micacés pyriteux avec des passées d'argile gris foncé silteuse, micacée, indurée.
129 (522, 20)		T	
130 (528, 60)	626,0		"Grès de Sbâa": grès blanc, fin à moyen, glauconieux à ciment siliceux avec fines passées d'argile gris foncé, indurée.
131 (530, 40)	675,0		
132 (638, 60)			Alternance de grès blanc fin à très fin, micacé à ciment siliceux à silico-argileux, d'argile gris foncé indurée, silteuse, micacée et de siltstone gris à gris blanc micacé moyennement dur.
		St	
	900,0		

S B A A-3

		Co	Sable clair à granulométrie variable passant à des grèsbeiges ferrugineux à ciment dolomitique avec des passées argileuses colorées et quelques passées dolomitiques gréseuses et quelques lits calcifères cristallins.
	321,0		
56 (393,70)		J	Alternance d'argile et de grès clairs argilo-dolomitiques avec quelques passées de dolomie microcristallines. Présence de pyrite.
57 (395,80)	397,0		
58 (397,00)			Argile sombre micacée. Rares passées de grès clair fin bien consolidé à ciment silico-argileux.
59 (438,10)			
60 (438,80)			
61 (440,00)		T	"Grès de Sbâa": grès clair fin friable légèrement glauconieux, à ciment argillo-carbonaté.
62 (443,00)	475,5		
63 (446,50)			
63b (492,50)	526,0		
		St	Siltstone blanc micacé assez dur, alternant avec des argiles foncées bien indurées silto-micacées et des grès fins assez bien consolidés et à ciment silico-argileux.
64 (741,80)			
65 (742,60)			
66 (744,50)			
67 (746,40)			
	815,0		
		Fa	Argile sombre silto-micacée avec passées de siltstone beige compact et de rares petits bancs de grès beiges fins.
	1000,0		

68 (1287,40)
 69 (1289,80)
 70 (1300,00)
 71 (1307,00)
 72 (1336,70)
 73 (1340,00)
 74 (1342,20)
 74b (1344,10)
 75 (1354,00)

1117,0

Fr

Argile grise feuilletée riche en fossiles, avec fines passées de siltstone et calcaire crayeux. Le sommet de l'étage est marqué par un niveau d'environ 6 m de calcaire blanc crayeux.

1335,0

1364,0

G

Calcaire clair légèrement gréseux avec fines intercalations d'argile sombre.

Si

Argile noire feuilletée silto-micacée. Quelques passées de siltstone gris et de calcaire blanc crayeux tendre.

1902,0

Ca/O

Argile foncée micacée feuilletée avec intercalations de grès beige fin à grossier bien cimenté, parfois glauconieux.

76 (2049,00)

76b (2050,30)

1120,0

SBAR-3 (fin)

Ca/O

Grès quartzitique clair très dur, massif à ciment carbonaté. Stratification entrecroisée avec de fines passées d'argile sombre.

ODZ-1

	25,0	3	Calcaire Blanc gréseux et grès grossier friable.
		Co2	Sable translucide grossier avec passées argileuses rougeâtres plus ou moins sableuses et de grès moyen mal consolidé.
	270,0		
		Co1	Grès rouge fin dolomitique avec passées d'argile rouge et blanchâtre et sableuse et des lits fins de calcaire dolomitique.
	518,0		
		J	Alternance d'argile rouge tendre de grès vert dolomitique et de grès blanc avec quelques traces d'anhydrite blanche.
77 (615,35) 78 (623,20)	611,0		
79 (676,90)		N	
80 (726,10) 81 (748,30) 82 (755,10) 83 (764,25)	735,5		Argile silteuse sombre, parfois pyriteuse avec des passées fines de grès blanc micacé légèrement glauconieux assez friable. Quelques lits de dolomie et de calcaire fossilifère.
84 (806,00) 85 (813,10) 86 (838,00)	835,5	T2	
		T1	"Grès de Sbâa": grès gris fin bien classé parfois glauconieux et légèrement carbonaté.
	1007,0		
	1009,0		

87 (1110,50)

68 (1116,70)

1125,5

St

Grès clair fin glauconieux micacé assez friable avec intercalation de siltstone foncé et d'argile silto-micacé sombre à pyrite.

Fa

Argile silteuse micacée assez foncée et feuilletée. Présence de pyrite, de fines passées de siltstone beige, et traces de dolomie cristalline.

1419,0

1432,0

Calcaire clair fossilifère.

Fr

Argile grise silteuse indurée. Quelques traces de grès siliceux et de calcaire blanc.

1630,0

1643,5

1678,0

G

Calcaire microcristallin compacté riche en micro-fossiles.

GEDINNIEN: grès blanc fin alternant avec argile micacée foncée.

Si

Argile foncée silteuse avec fines passées de calcaire tendre.

89 (2107,30)

2120,0

ODZ-1 (fin)

O

Grès beige assez fin légèrement pyriteux avec de rares grains de quartz et quelques fines passées argileuses claires.

2367,0

Ca

Grès blanc assez grossier, quartzitique assez bien consolidé.

AZNW-1

51,0 82,5 122,0	C1	Calcaire dolomitique beige compact alternant avec de l'argile rougeâtre carbonatée. Dolomie rose cristalline. Argile marron claire légèrement dolomitique.
270,0	Co2	Sable coloré assez grossier avec des passées argileuses et de rares passées dolomitiques rougeâtres.
82 (803,10) 83 (807,70) 84 (827,55) 85 (828,55) 86 (845,20) 37 (846,45) 38 (847,80) 39 (849,45) 40 (862,50) 41 (867,75) 42 (874,15) 43 (880,35) 44 (883,15) 45 (888,50) 46 (889,75) 47 (891,30) 48 (894,40) 49 (905,85) 50 (913,70) 51 (938,56) 52 (994,60)	Co1	Alternance de sable jaune-rose assez grossier, de grès coloré fin, de carbonates endurcis, de dolomie rouge et d'argile silteuse.
742,5 793,0	J	Argile rougeâtre silto-sableuse avec quelques fines passées gréseuses friables à ciment argileux.
904,5	St	Argile noire indurée plus ou moins dolomitique alternant avec des grès beiges friables.

AZNW-1(fin)

53(1117,70)

54(1121,70)

55(1124,50)

Fa

1190,5

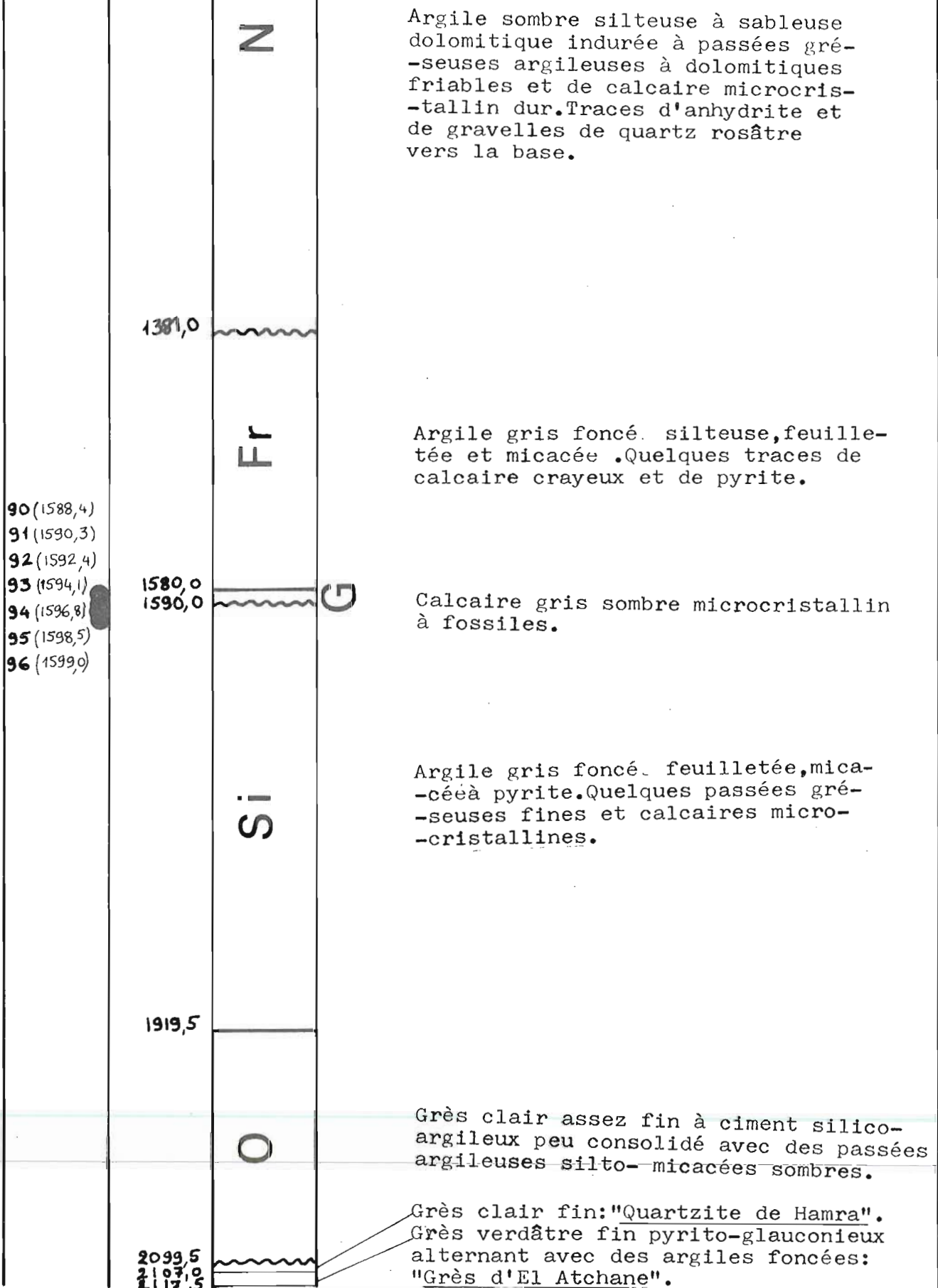
Fr

Argile sombre finement litée, légèrement silteuse avec des passées de grès gris-blanc très fins.

Calcaire blanc fossilifère alternant avec des passées argileuses noires feuilletées.

OTLA-1

		Co4	Grès friable, sable blanc à passées argileuses, silteuses et plastiques.
	253,0	Co3	Argile sableuse brun-rouge avec passées de grès blanc fin à ciment argileux.
	295,0	Co2	Grès friable ou sable à passées d'argile brun-rouge sableuse. Sable localement consolidé.
	604,0	Co1	Alternance de grès clairs et sombres à ciment argileux et carbonaté et d'argiles silto-gréseuses brun-rouge à verdâtres avec traces de lignite et de dolomie microcristalline.
	929,0		



2134,0	Ca / O	Argile noire silteuse à passées de grès verdâtre glauconieux et pyriteux à ciment argilo-silteux: "Argile d'El Gassi".
2160,0		Alternance de grès quartzitique assez fin et d'argile sombre légèrement mica-cée. <u>Passage Cambrien-Ordovicien.</u>
2250,0	Ca	Grès quartzitique à granulométrie irrégulière avec des passées argileuses verdâtres et de nombreuses tigillites.

LT-1

Dolomie argileuse microcristalline beige compacte.

Co

Sable jaune assez grossier à intercalations d'argile rougeâtre et de dolomie argileuse.

641,5

N

Argile brun tendre à passées de siltstone gris-vert friable. Présence de gypse blanc fibreux et de traces de pyrite.

947,0

St

Grès clair assez fin friable, localement glauconieux à ciment silico-dolomitique et intercalations argileuses à fossiles (tigillite).

LT-1 (fin)

112 (1051,40)		
113 (1053,60)		
114 (1054,80)	1036,5	
115 (1057,10)		
116 (1062,10)	1057,0	
117 (1064,20)		
118 (1070,20)		
119 (1086,10)		
120 (1090,45)		
120 (1104,20)	1124,0	Fr
121 (1115,40)		
122 (1120,10)		
123 (1124,00)		
124 (1127,20)		
125 (1131,15)	1210,0	Fr

Argile brune tendre à brachiopodes et tigillites.

Alternance d'argile sombre légèrement micacée et de grès clair très fin compacté.

Argile noire silteuse feuilletée avec quelques traces de calcaire.

Calcaire compact clair alternant avec des argiles noires silteuses.

LT N W - 1

25,0

Dolomie beige microcristalline argileuse compacte.

145,0
150,0

Dolomie brune argilo-gréseuse.

Co

Sable jaune assez grossier avec passées argileuses silto-sableuses.

560,0

Z

Argile rougeâtre silto-sableuse tendre avec quelques passées dolomitiques gréseuses ou de calcaire crayeux.

97 (1354,60)			
98 (1357,40)			
99 (1386,75)	1346,0		Argile gris-noir silto-micacée avec pas - sées gréseuses.
100 (1389,75)			
101 (1390,85)	1395,0	T	Grès clair assez fin silico- argileux
102 (1394,15)			
103 (1453,45)	1435,0		
104 (1454,35)			
105 (1458,00)			
106 (1508,90)		St	Complexe d'argile gris-noir et de grès clair assez fin.
107 (1511,80)			
108 (1516,55)			
109 (1529,55)	1554,0		Argile micacée foncée feuilletée avec de rars passées gréseuses blanches.
110 (1533,55)	1587,0		
111 (1535,80)			
		Fa	Argile grise micacée tendre avec inter- -calations gréseuses fines claires et quelques traces de calcaire blanc tendre. Présence de fossiles et de pyrite.
	1750,5		
	1760,0		Calcaire blanchâtre crayeux bioclastique tendre.
		Fr	
	1800,0		Argile silteuse grise légèrement micacée fossilifère.

ANNEXE II : METHODES
ANALYTIQUES

1- DOSAGE DU CARBONE ORGANIQUE

Le dosage du carbone organique et du carbone total a été effectué grâce à un analyseur type Carmograph (Wösthoff).

Les échantillons sont pyrolysés à 1100°C sous atmosphère oxydante. Le CO₂ dégagé par la combustion est acheminé par un courant d'oxygène jusqu'à une solution de soude (NaOH, N/250) dont il modifie la conductivité; cette modification est proportionnelle à la quantité de CO₂ dégagé. Les pourcentages pondéraux de carbone sont calculés après étalonnage de l'appareil avec des quantités connues de CaCO₃ pur.

Le carbone organique est dosé après élimination préalable des carbonates par l'acide chlorhydrique (HCl, 2N) jusqu'à disparition de l'effervescence; l'acide est ensuite évaporé à 40°C.

2- PYROLYSE ROCK-EVAL

La technique de pyrolyse Rock-Eval a été mise au point par Espitalié et al. (1977) et améliorée par Espitalié et al. (1985, 1986).

Le dispositif analytique est schématisé dans la figure 63. La méthode consiste à chauffer, en programmation de température (25°C / mn), sous atmosphère inerte (hélium), un échantillon de roche (100 mg environ) afin de déterminer quantitativement:

- les hydrocarbures libres (sous forme de gaz ou d'huile) contenus dans le sédiment et susceptibles d'être libérés à une température inférieure à 300°C. Ils constituent le pic P1 dont l'intégrale S1 est représentative de la quantité d'hydrocarbures présents;

- les composés hydrocarbonés libérés par craquage thermique du kérogène lorsque la matière organique est chauffée jusqu'à 550°C (pic P2). L'intégrale S2 du pic P2 est représentative de la quantité d'hydrocarbures formés;

- les composés oxygénés (CO₂) libérés par pyrolyse de la matière organique jusqu'à 390°C (pic P3). Le CO₂ dégagé est piégé, désorbé en fin d'analyse par réchauffage du piège, puis dosé. L'intégrale S3 du pic P3 est représentative de la quantité de CO₂ analysé.

La température de 390°C a été choisie pour éviter un éventuel mélange du CO₂ formé avec le CO₂ produit par la décomposition des carbonates qui commencent à se dissocier à partir de cette température.

97 (1354,60)			
98 (1357,40)			
99 (1386,75)	1346,0		Argile gris-noir silto-micacée avec pas - sées gréseuses.
100 (1389,75)	1395,0	T	
101 (1390,85)			Grès clair assez fin silico- argileux
102 (1394,15)	1435,0		
103 (1453,45)			
104 (1454,35)			
105 (1458,00)		St	Complexe d'argile gris-noir et de grès clair assez fin.
106 (1508,90)	1554,0		
107 (1511,80)			
108 (1516,55)	1587,0		Argile micacée foncée feuilletée avec de rars passées gréseuses blanches.
109 (1529,55)			
110 (1533,55)			
111 (1535,80)			
		Fa	Argile grise micacée tendre avec inter- -calations gréseuses fines claires et quelques traces de calcaire blanc tendre. Présence de fossiles et de pyrite.
	1750,5		
	1760,0		Calcaire blanchâtre crayeux bioclastique tendre.
	1800,0	Fr	Argile silteuse grise légèrement micacée fossilifère.

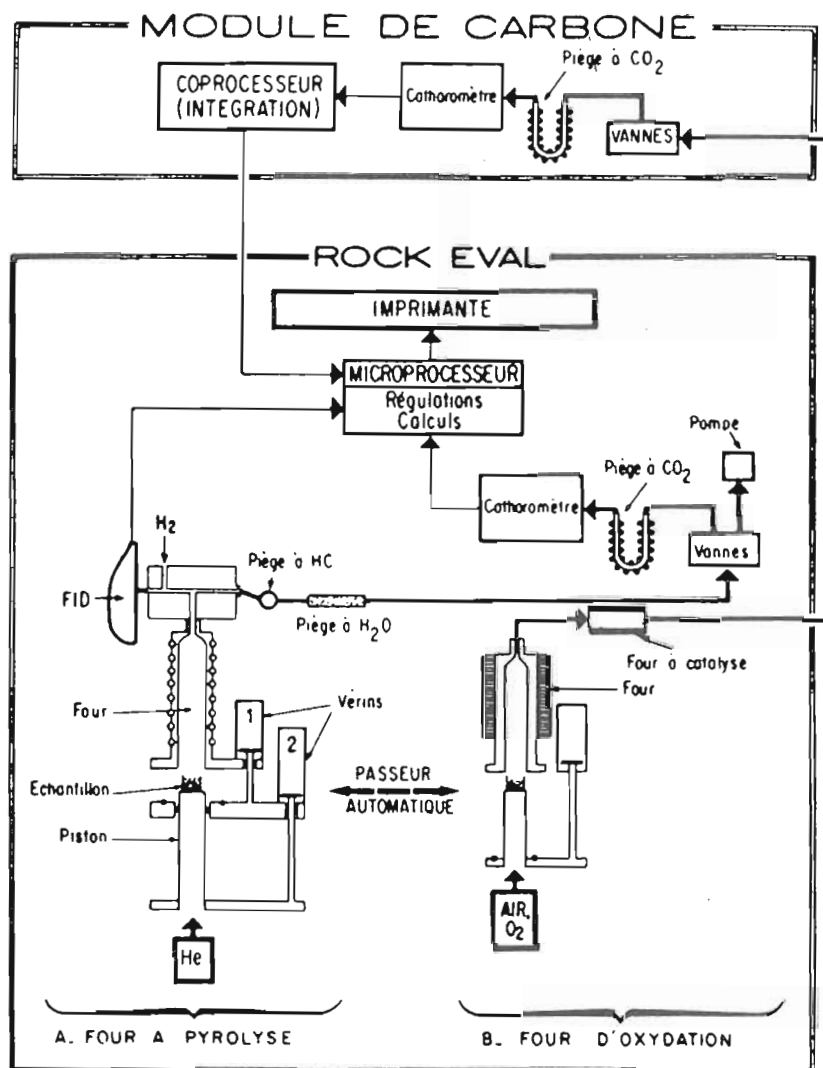
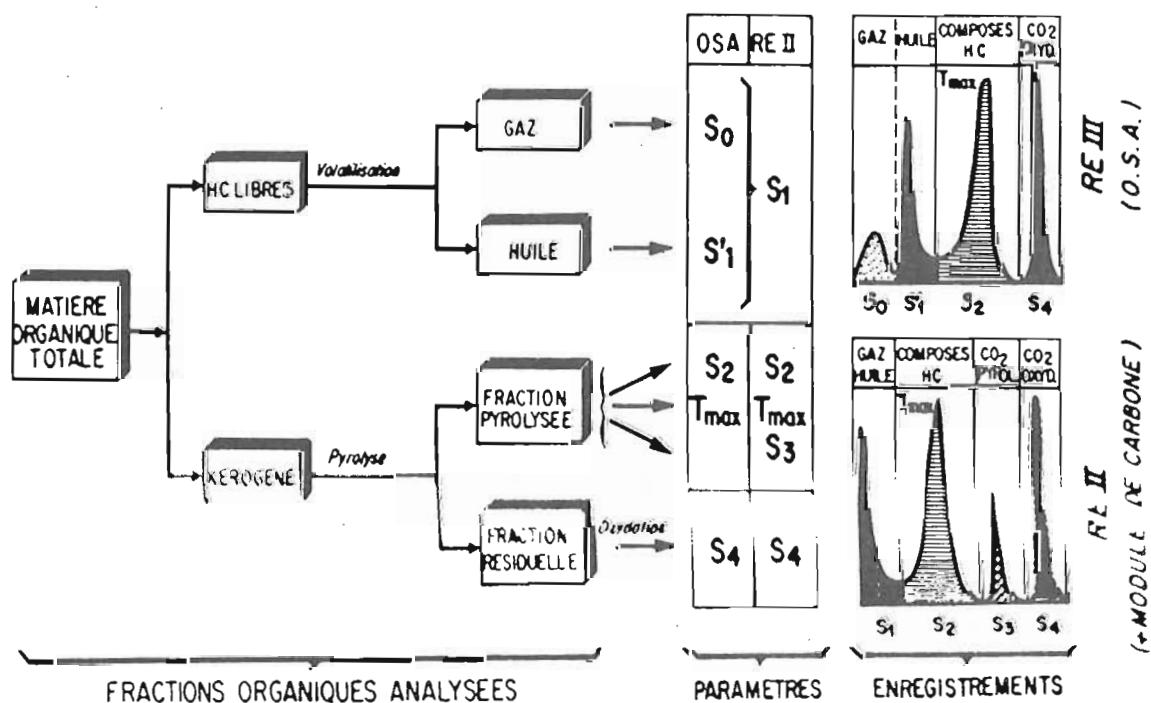


Schéma de principe du Rock-Eval II (d'après Espitalié et al., 1985)

Fig: 63



Les différentes fractions étudiées de la matière organique totale des roches, les paramètres correspondants et leurs enregistrements. selon le type d'appareil utilisé (d'après Espitalié et al., 1985)

Les composés hydrocarbonés libérés sont détectés par ionisation de flamme et le CO₂ par catharométrie. Ces composés hydrocarbonés et oxygénés sont dosés par comparaison avec une roche étalon dont la composition élémentaire et les teneurs en hydrocarbures libres et potentiels sont connues. Les quantités sont exprimées en mg / g de roche.

Comme nous l'avons vu dans le paragraphe A-II-1-2 de la Troisième partie, on définit à partir des données précédentes les paramètres suivants: l'index d'hydrogène (IH), l'index d'oxygène (IO) et l'index de production (IP).

Ces index permettent de caractériser l'origine et l'état d'évolution de la matière organique. Ils sont respectivement corrélables avec les rapports atomiques H/C, O/C et avec les quantités d'extrait. Enfin, la température (T_{max}) est un indicateur d'évolution de la matière organique de chacune des séries (Espitalié et al., 1977; Espitalié et al., 1985).

3- ANALYSE ELEMENTAIRE

3-1- Carbone et hydrogène

L'échantillon est introduit dans une chambre de combustion où il est brûlé en présence d'un excès d'oxygène à une température de 1050°C. Les gaz de combustion passent sur divers réactifs qui éliminent les gaz gênants (composés fluorés et produits de combustion du soufre, du chlore, du brome etc.).

3-1-1- Dosage du carbone

Après piégeage par congélation de l'eau formée et fixation des oxydes d'azote sur MnO₂, le CO₂ formé est entraîné par un courant d'oxygène dans la cellule d'électrolyse du coulomètre. Il modifie alors le pH du milieu et le retour au pH initial est assuré par l'électrolyse de la solution. La quantité d'électricité nécessaire est proportionnelle à la quantité de CO₂ formé, et donc à la quantité de carbone présent dans l'échantillon.

3-1-2- Dosage de l'hydrogène

Le piège à H₂O (voir ci-dessus) est réchauffé après avoir été balayé par un courant d'azote pour éliminer toute trace d'oxygène. La vapeur d'eau est

entraînée sur du charbon amorphe porté à 1120°C. Il y a formation de CO, lui-même transformé quantitativement en CO₂ par passage sur CuO (450°C). Ce CO₂ est dosé par coulométrie. La quantité de CO₂ mesurée est proportionnelle à la quantité d'hydrogène présent dans l'échantillon.

3-2- Oxygène

L'échantillon est pyrolysé sous courant d'azote à 1000°C. Les gaz de pyrolyse sont entraînés sur du charbon amorphe (1120°C). Il y a formation de CO, puis de CO₂ qui est dosé également par coulométrie. Les composés soufrés et halogénés éventuellement formés sont piégés au préalable sur divers réactifs.

3-3- Azote

L'échantillon est entraîné dans une chambre de combustion portée à 1050°C par de l'hélium contenant 3 % d'oxygène. La combustion est rendue complète par passage des gaz de combustion sur CuO à 900°C: les gaz sont alors débarrassés des produits de combustion du soufre et des halogènes. Les oxydes d'azote sont réduits à l'état d'azote moléculaire et l'excès d'oxygène est retenu sur Cu à 500°C. Le CO₂, les acides et l'eau sont retenus sur divers réactifs. L'azote moléculaire est titré par catharométrie.

3-4- Soufre

L'échantillon est brûlé à 1100°C sous atmosphère d'hélium oxygéné à 3 %. Les oxydes formés passent sur CuO puis Cu réduit pour parfaire la transformation de SO₃ en SO₂. Le dosage de SO₂ se fait par coulométrie.

3-5- Fer

Après une attaque à l'acide perchlorique et à l'acide nitrique et un chauffage jusqu'à apparition de vapeurs blanches, l'échantillon est mis en solution dans des fioles jaugées. Ces solutions sont ensuite dosées par absorption atomique. Les différentes concentrations en fer sont déterminées à partir de solutions étalons.

4- ANALYSE PAR CHROMATOGRAPHIE EN PHASE GAZEUSE

Elle a été effectuée grâce à un chromatographe Girdel 3000, dans les conditions suivantes:

- Programmation de température: 60-310°C; 3°C/mn puis 20mn à 310°C
- Température de l'injecteur: 250°C
- Température du détecteur à ionisation de flamme (FID): 280°C.
- Gaz vecteur: hélium.
- Débit de gaz-vecteur: 25 ml/mn: (22,5 ml/mn vers la fuite; 2,5 ml/mn vers la colonne)
- Colonne capillaire type OV 17 de 25 m de longueur et 0,5 mm de diamètre, remplie d'une phase stationnaire composée d'huile siliconée CPsil 5.
- Intégrateur/enregistreur: ENICA 21 (Delsi Instruments)

5- COUPLAGE PYROLYSE-CPG

De 60 à 220 µg de kérogène sont déposés sur l'extrémité, en forme de microcuillère, d'une tige en acier (figure 64). Cette tige est introduite dans une zone étanche et froide de l'avant-four. Le système est purgé par de l'hélium pendant quelques secondes. On introduit ensuite rapidement l'échantillon dans la partie chaude du four porté préalablement à la température voulue pendant 30 secondes. Les produits volatilisés s'accumulent en tête de la colonne chromatographique refroidie à -50°C. Une programmation de température de -50 à 300°C à 5°C / mn sépare sur la colonne les différents constituants qui sont détectés par un détecteur à ionisation de flamme (FID).

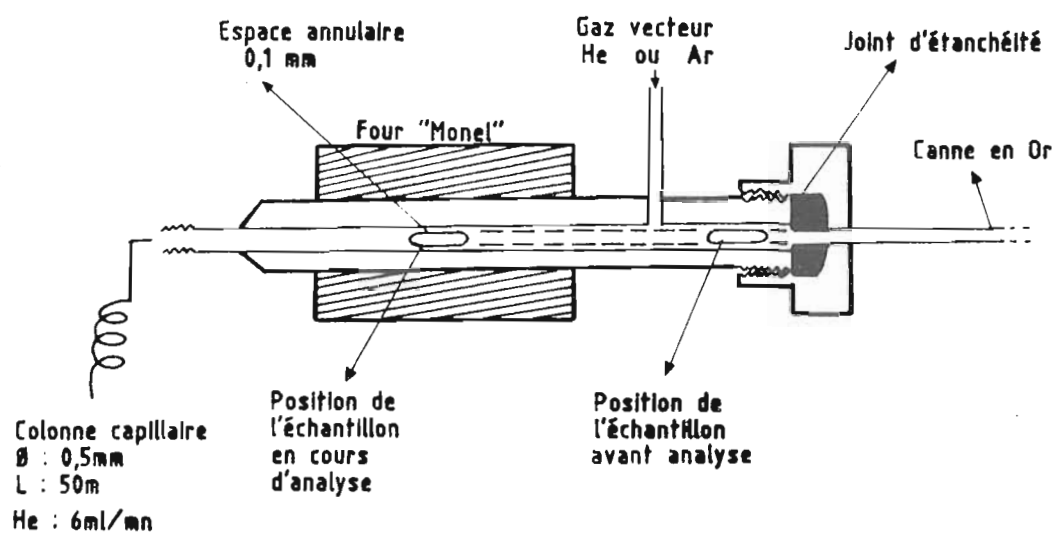


Figure 64 : Schéma du pyrochromatographe, type "Microfour Girdel"
 (d'après Béhar and pelet, 1985)

6- PYROLYSE DES TASMANACEES EN MILIEU CONFINE

Une cinquantaine de milligrammes de Tasmanacées sont placés dans un tube en or rempli d'argon à pression atmosphérique qui est ensuite fermé.

Le tube est introduit dans un autoclave placé dans un four. Un thermocouple est positionné sur l'échantillon et raccordé à un enregistreur afin de disposer d'un suivi continu de la température. Une pression de gaz (azote ou mélange azote-hélium) en général voisine de 80 MPa est appliquée dans l'autoclave.

La température choisie (322°C dans notre cas) est atteinte en suivant une rampe de 4°C / mn, puis maintenue pendant 48 h. A la fin, l'autoclave est immédiatement retiré du four et refroidi par un jet d'air comprimé qui diminue la température interne d'au moins 50°C la première minute. L'autoclave est ensuite amené à pression atmosphérique, puis ouvert.

Le contenu du tube est soumis ensuite à un protocole analytique permettant l'analyse des gaz (C1-C6), de la fraction intermédiaire (C6-C13), des C13+ et du résidu solide. Pour ce faire, le tube est introduit dans un dispositif, le perceur, faisant lui même partie d'une ligne d'analyse qui permet de prélever:

- d'abord la fraction gaz (C1-C6). Un aliquote de cette fraction est injecté directement en tête de colonne chromatographique (Ti= -100°C; Tf= 200°C; 10°C / mn). Les hydrocarbures sont détectés par FID.

- puis la fraction intermédiaire (C6-C13). Cette fraction est piégée dans de l'azote liquide, éluée par du nC5, puis pesée. Un aliquote est alors injecté dans une colonne apolaire (Ti= -10°C; Tf= 250°C; 5°C/mn). La quantification de cette fraction est obtenue en utilisant comme étalon une solution de titre connu d'huile de paraffine.

- enfin, la fraction C13+. Le fractionnement des C13+ en hydrocarbures saturés, aromatiques et produits polaires est effectué par chromatographie liquide sur mini-colonnes. Ce protocole est décrit dans le paragraphe A-11-3-1 de la Troisième partie.

ANNEXE III: TABLEAUX DE
RESULTATS

Légende des tableaux 14 à 23 :

- $S_1 + S_2$ = Potentiel pétrolier total
- $IP = \frac{S_1}{S_1 + S_2}$ = Index de production
- IH = Index d'hydrogène
- IO = Index d'oxygène
- $T_{max.}$ = Température détectée au sommet du pic S_2

La signification de ces différents paramètres est détaillée dans le texte

Etage	Profondeur	C.org.	S ₁ ' HC	S ₂ ' HC	S ₃ ' CO ₂	S ₁ +S ₂	IP.	I.H.	i.O.	T _{max} .
	m	%	mg/g de roche	mg/g de roche	mg/g de roche	mg/g de roche	% C.org.	mgHC/gC.org	mgCO ₂ /gC.org	°C
Tournaisien	459,60	1,41	0,13	1,31	0,19	1,45	102,49	9,03	13	423
	464,00	1,47	0,12	1,25	0,22	1,37	93,04	8,76	15	427
	471,50	1,48	0,12	1,28	0,30	1,40	94,74	8,57	20	425
	502,80	0,86	2,15	3,57	0,21	5,72	664,53	37,59	25	417
	536,00	0,53	0,04	0,38	0,41	0,42	98,95	9,52	78	429
Strunien	540,60	2,20	0,26	5,61	0,22	5,86	266,55	4,43	10	433
	569,00	0,99	0,10	0,99	0,21	1,09	110,15	9,17	22	427
Tournaisien	570,50	1,50	0,22	1,44	0,81	1,66	110,66	13,25	54	427
Strunien	629,80	1,57	0,14	2,31	0,24	2,46	156,45	5,71	15	423
	637,80	1,73	0,25	3,55	2,53	3,81	219,96	6,58	146	429
	641,80	2,09	0,41	5,69	0,56	6,09	291,51	6,72	27	429
	644,80	2,13	0,29	6,74	0,45	7,03	330,19	4,13	21	438
Givétien	1309,00	3,25	0,66	10,87	0,33	11,53	354,91	5,72	10	438
	1312,80	5,53	1,22	18,46	0,42	19,68	355,92	6,20	8	444
	1316,80	5,04	0,95	20,75	0,40	21,70	430,57	4,38	8	442
	1319,50	4,26	0,79	16,15	0,37	16,94	397,65	4,66	9	446
	1328,80	1,71	0,37	8,57	0,19	8,93	522,37	4,14	11	442
Silurien	1331,40	1,50	0,39	7,53	0,17	7,92	527,81	4,92	11	442
	1335,80	0,99	0,43	3,77	0,76	4,21	424,79	10,24	77	444
	1337,50	0,88	0,44	2,87	0,80	3,30	375,55	13,29	91	442
	1407,60	1,00	0,46	2,98	0,47	3,45	344,58	13,37	47	440
	1411,80	0,75	0,26	2,16	0,29	2,42	322,70	10,74	39	442
	1414,90	1,65	0,36	5,23	0,18	5,59	338,54	6,44	11	446
	1417,60	1,50	0,48	5,54	0,20	6,02	401,66	7,97	13	440
	1421,50	1,68	0,44	4,94	0,21	5,38	320,49	8,18	13	438

Tableau 14 : Teneurs en carbone organique et valeurs des différents paramètres tirés de l'analyse en pyrolyse Rock-Eval des sédiments bruts du sondage SBAH-1. (voir légende plus haut)

Etage	Profondeur m	C.org. %	S ₁ ' HC mg/g de roche	S ₂ ' HC mg/g de roche	S ₃ ' CO ₂ mg/g de roche	S ₁ +S ₂ mg/g de roche	mg/g de C.org.	IP. %	IH. mgHC/gC.org.	IO. mgCO ₂ /gC.org.	T _{max} . °C
Tournaisien	551,00	0,48	0,01	0,14	0,18	0,15	31,04	6,67	29	38	421
	559,00	0,33	0,01	0,06	0,31	0,06	18,78	14,29	17	94	427
	582,40	0,39	0,02	0,32	0,14	0,34	87,96	5,88	83	37	425
	608,80	0,61	0,03	0,51	0,20	0,54	88,76	5,56	84	33	417
	610,80	1,02	0,01	0,90	0,19	0,90	88,51	1,09	88	19	431
	614,00	0,93	0,03	1,06	0,28	1,09	116,91	2,75	114	30	431
	615,00	0,78	0,02	0,87	0,15	0,89	114,08	2,25	112	19	429
	618,50	0,81	0,01	0,53	0,17	0,54	66,95	1,85	66	20	433
	621,00	0,72	0,01	0,60	0,12	0,61	85,21	1,64	83	17	431
	622,00	0,60	0,01	0,27	1,98	0,27	45,75	3,57	45	330	429
	734,70	0,90	0,06	0,79	0,13	0,85	94,56	7,06	88	14	421

Tableau 15 : Teneurs en carbone organique et valeurs des différents paramètres tirés de l'analyse en pyrolyse Rock-Eval des sédiments bruts du sondage SBAAN-1. (voir légende plus haut)

Enage	Profondeur m	C.org. %	S ₁ , HC mg/g de roche	S ₂ , HC mg/g de roche	S ₃ , CO ₂ mg/g de roche	S ₁ +S ₂ mg/g de		IP. %	IH. mgHC/gC.org.	IO. mgCO ₂ /gC.org.	T _{max} . °C
						roche	mg/g de C.org.				
Tournaisien	514,20	0,29	0,03	0,27	0,16	0,29	100,64	10,00	92	53	417
	518,00	0,30	0,03	0,54	0,29	0,57	70,83	5,26	67	35	431
	520,20	0,94	0,05	1,07	0,26	1,11	118,39	4,46	114	25	425
	522,20	1,03	0,04	1,68	0,24	1,72	166,53	2,33	163	23	421
	528,60	0,80	0,07	0,88	0,24	0,95	118,95	7,37	110	30	421
	530,40	1,18	0,05	2,56	0,19	2,61	220,96	1,92	217	16	429
	638,60	0,68	0,56	2,04	0,19	2,60	391,94	21,54	299	23	410

Tableau 16 : Teneurs en carbone organique et valeurs des différents paramètres tirés de l'analyse en pyrolyse Rock-Eval des sédiments bruts du sondage SBA-2A. (voir légende plus haut)

Etage	Profondeur	C.org.	S ₁ ⁺ HC	S ₂ ⁺ HC	S ₃ ⁺ CO ₂	S ₁ +S ₂	IP.	IH.	IO.	T _{max}	
	m	%	mg/g de roche	mg/g de roche	mg/g de roche	mg/g de roche	mg/g de C.org.	%	mgHC/gC.org.	mgCO ₂ /gC.org.	°C
Tournaisien	395,80	0,53	0,06	0,40	0,14	0,45	85,51	13,04	75	26	433
	438,10	1,25	0,10	0,75	0,33	0,85	68,09	11,76	60	27	431
	438,80	1,17	0,33	1,41	2,51	1,74	148,81	18,97	120	223	427
	440,00	1,45	0,26	2,16	0,39	2,42	167,13	10,74	149	27	433
	443,00	1,02	0,23	1,63	0,17	1,87	183,00	12,37	160	16	431
	446,50	1,33	0,14	1,55	0,40	1,69	127,35	8,28	116	30	431
Strunien	741,80	0,22	0,05	0,43	0,10	0,48	217,14	10,42	194	45	436
	742,60	1,10	0,15	1,35	0,49	1,50	136,06	10,00	123	44	433
	744,50	1,84	0,23	3,11	0,25	3,34	181,33	6,89	169	14	438
	746,40	1,03	0,10	1,10	0,29	1,19	115,30	9,33	106	48	440
Frasnien	1287,40	0,93	0,24	2,41	0,22	2,65	284,50	9,06	259	23	444
	1289,80	1,36	0,56	4,30	0,23	4,85	356,94	11,52	316	17	440
	1300,00	0,66	0,19	0,72	0,07	0,91	137,88	20,88	225	21	443
Givétien	1307,00	1,00	0,26	2,15	0,24	2,41	240,64	10,79	215	24	442
	1336,70	5,44	1,10	14,16	0,40	15,26	280,45	7,21	260	7	440
	1340,00	1,90	0,25	6,22	0,25	6,48	341,10	3,86	328	15	444
	1342,20	5,30	1,05	22,03	0,50	23,08	435,39	4,55	416	9	444
	1354,00	1,79	0,32	9,72	0,25	10,04	560,93	3,19	543	14	450
Silurien	2049,00	0,52	0,01	0,03	0,06	0,04	7,69	25,00	13	286	448

Tableau 17 : Teneurs en carbone organique et valeurs des différents paramètres tirés de l'analyse en pyrolyse Rock-Eval des sédiments bruts du sondage SB34-3. (voir légende plus haut)

Etage	Profondeur m	C.org. %	S ₁ ['] HC mg/g de roche	S ₂ ['] HC mg/g de roche	S ₃ ['] CO ₂ mg/g de roche	S ₁ *S ₂ mg/g de roche	S ₁ *S ₂ mg/g de C.org.	IP. %	IH. mgHC/gC.org.	IO. mgCO ₂ /gC.org.	T _{max} . °C
Namurien	615,35	0,82	0,03	0,22	0,18	0,25	30,73	12,00	27	22	423
	623,20	0,69	0,02	0,28	0,15	0,30	42,96	6,67	40	21	431
	676,90	0,41	0,03	0,15	0,28	0,17	42,34	16,67	36	69	421
	726,10	0,61	0,01	0,04	0,18	0,05	7,93	20,00	6	30	427
Tournaisien	748,30	0,73	0,08	0,73	0,17	0,81	110,99	9,88	100	23	431
	755,10	1,06	0,10	1,07	0,50	1,17	110,42	8,55	101	47	436
	764,25	0,92	0,18	1,17	0,34	1,36	147,38	13,33	128	37	433
	806,00	1,52	0,09	1,75	0,25	1,84	121,29	4,89	115	16	438
	813,10	1,64	0,09	1,79	0,37	1,88	114,40	4,79	109	23	431
	838,00	0,80	0,09	0,67	3,71	0,76	95,27	11,84	84	464	433
Strunien	1110,50	2,19	0,20	5,34	0,61	5,55	253,36	3,61	244	28	438
	1116,70	1,81	0,10	3,02	0,24	3,12	172,12	3,21	167	13	442
Silurien	2107,30	3,79	0,09	0,76	0,22	0,85	22,45	10,59	20	6	456

Tableau 18 : Teneurs en carbone organique et valeurs des différents paramètres tirés de l'analyse en pyrolyse Rock-Eval des sédiments bruts du sondage ODZ-1. (voir légende plus haut)

Etage	Profondeur	C.org.	S ₁ ⁺ HC mg/g de roche	S ₂ ⁺ HC mg/g de roche	S ₃ ⁺ CO ₂ mg/g de roche	S ₁ +S ₂ mg/g de C.org.	IP.	IH.	IO.	T _{max} .	
m	%						%	mgHC/gC.org.	mgCO ₂ /gC.org.	°C	
Strunien	803,10	1,29	0,02	2,03	0,27	2,04	158,32	0,98	157	21	425
	807,70	0,86	0,01	0,37	0,24	0,38	43,96	2,63	43	27	433
	827,55	1,49	0,02	2,56	0,69	2,68	179,71	0,75	179	46	433
	828,55	2,07	0,03	2,29	0,90	2,32	111,84	1,29	110	44	427
	845,20	0,98	0,01	0,29	0,22	0,30	30,44	3,33	30	23	429
	846,45	0,83	0,01	0,28	0,42	0,29	34,90	3,45	33	51	431
	847,80	1,02	0,01	0,32	0,33	0,33	32,28	3,03	31	33	427
	849,45	0,61	0,02	0,19	0,47	0,20	33,37	9,52	30	77	425
	862,50	1,19	0,03	0,59	0,70	0,92	77,39	3,26	75	59	436
	867,75	1,55	0,01	2,52	0,21	2,54	163,58	0,40	163	13	431
	874,15	0,85	0,02	0,54	0,25	0,66	77,31	3,03	75	29	425
	880,35	1,09	0,01	0,52	0,44	0,53	48,17	1,89	47	40	431
	883,15	1,12	0,03	1,14	0,39	1,97	176,09	1,52	174	35	431
	888,50	1,68	0,06	2,23	0,56	2,49	148,21	2,41	144	33	429
	899,75	1,32	0,03	1,72	0,24	1,75	132,31	1,71	130	18	436
Famennien	891,30	0,17	0,01	0,06	0,11	0,07	39,13	14,29	32	64	423
	905,40	2,09	0,07	5,34	0,94	5,41	258,84	1,29	255	45	429
	913,70	1,37	0,06	2,15	0,22	2,20	160,76	2,71	157	16	433
	983,55	0,80	0,06	0,79	0,26	0,85	105,67	7,06	99	33	429
	991,60	1,44	0,05	1,52	0,32	1,67	116,09	2,99	113	22	427
	1117,70	1,22	0,05	1,26	0,22	1,31	107,76	3,82	104	18	429
	1121,70	1,82	0,04	2,95	0,30	2,99	164,06	1,34	162	16	431
1124,50	1,64	0,05	1,93	0,31	1,97	120,40	2,53	118	19	440	

Tableau 19 : Teneurs en carbone organique et valeurs des différents paramètres tirés de l'analyse en pyrolyse Rock-Eval des sédiments bruts du sondage AZNW-1. (voir légende plus haut)

Etage	Profondeur m	C.org. %	S ₁ , HC mg/g de roche	S ₂ , HC mg/g de roche	S ₃ , CO ₂ mg/g de roche	S ₁ +S ₂ mg/g de roche	S ₁ +S ₂ mg/g de C.org.	IP. %	IH. mgHC/gC.org.	IO. mgCO ₂ /gC.org.	Tmax. °C
Sturien	1588,40	0,94	0,28	7,80	0,19	8,08	859,07	3,47	829	20	438
	1590,30	0,87	0,14	6,42	0,58	6,55	753,38	2,13	738	66	442
	1592,40	0,93	0,17	6,33	0,31	6,50	699,28	2,62	681	33	438
	1594,10	1,09	0,16	8,68	0,42	8,84	810,87	1,81	796	39	436
	1596,80	1,25	0,34	9,98	0,48	10,32	825,60	3,29	798	39	442
	1598,50	1,11	0,23	7,85	0,28	8,08	727,72	2,85	707	25	438
	1599,00	0,71	0,10	4,36	0,26	4,46	628,27	2,24	614	37	440

Tableau 20 : Teneurs en carbone organique et valeurs des différents paramètres tirés de l'analyse en pyrolyse Rock-Eval des sédiments bruts du sondage QTLA-1. (voir légende plus haut)

Etage	Profondeur	C.org.	S ₁ [*] HC mg/g de roche	S ₂ [*] HC mg/g de roche	S ₃ [*] CO ₂ mg/g de roche	S ₁ +S ₂ mg/g de roche	mg/g de C.org.	IP. %	IH. mgHC/gC.org.	IO. mgCO ₂ /gC.org.	T _{max} . °C
Famennien	m	%									
	1053,60	1,03	0,02	0,08	0,24	0,10	9,67	20,00	8	23	438
	1054,80	1,58	0,03	0,36	0,28	0,39	24,77	7,69	23	17	436
	1057,10	1,88	0,14	2,85	0,41	3,00	159,52	4,68	152	22	433
	1062,10	1,35	0,17	2,76	0,38	2,94	217,47	5,80	205	28	436
	1064,20	1,25	0,16	2,49	0,73	2,65	212,29	6,04	199	58	431
	1070,20	1,03	0,14	1,80	0,53	1,94	188,14	7,22	174	51	429
	1086,10	0,99	0,09	1,65	0,61	1,74	176,16	5,17	167	62	431
	1090,45	1,11	0,09	1,68	0,23	1,77	159,50	5,08	152	21	429
	1115,40	0,80	0,05	0,80	2,77	0,85	106,84	5,88	100	347	429
	1120,10	0,87	0,03	0,67	1,35	0,71	81,15	4,29	78	156	436
	1124,00	0,98	0,04	0,73	1,21	0,77	78,74	5,19	75	123	427
	1127,20	1,06	0,03	0,95	2,24	0,98	92,29	3,06	89	211	429
	1131,15	0,99	0,06	1,20	1,65	1,26	127,20	4,76	121	167	433

Tableau 21 : Teneurs en carbone organique et valeurs des différents paramètres tirés de l'analyse en pyrolyse Rock-Eval des sédiments bruts du sondage LT-1. (voir légende plus haut)

Profondeur m	C.org. %	S ₁ ⁺ HC mg/g de roche	S ₂ ⁺ HC mg/g de roche	S ₃ ⁺ CO ₂ mg/g de roche	S ₁ +S ₂		IP. %	IH. mgHC/gC.org.	IO. mgCO ₂ /gC.org.	T _{max} . °C
					mg/g de roche	mg/g de C.org.				
1305,90	1,29	0,02	0,95	0,42	0,98	75,78	2,06	74	33	427
1309,20	1,04	0,04	0,88	0,60	0,92	88,10	4,35	84	58	431
1311,20	0,98	0,01	0,37	0,23	0,37	38,19	2,63	37	23	423
1423,10	1,14	0,03	1,10	0,17	1,12	98,54	2,65	96	15	433
1427,60	1,26	0,08	1,46	0,20	1,54	122,16	5,19	116	16	431
1643,40	0,74	0,06	1,75	0,16	1,81	244,51	3,31	236	22	433

Tableau 22 : Teneurs en carbone organique et valeurs des différents paramètres tirés de l'analyse en pyrolyse Rock-Eval des sédiments bruts du sondage LT-2. (voir légende plus haut)

Étage	Profondeur m	C.org. %	S ₁ [*] HC mg/g de roche	S ₂ [*] HC mg/g de roche	S ₃ [*] CO ₂ mg/g de roche	S ₁ +S ₂ mg/g de roche	mg/g de C.org.	I.P. %	I.H. mgHC/gC.org.	I.O. mgCO ₂ /gC.org.	T _{max} °C
Tournaisien	1354,60	0,29	0,01	0,06	0,17	0,06	21,89	14,29	21	58	429
	1357,40	0,53	0,00	0,08	0,25	0,08	15,09	-	15	49	-
	1386,75	0,83	0,01	0,38	4,05	0,38	45,48	2,56	45	21	427
	1389,75	0,56	0,01	0,12	0,14	0,13	24,04	7,69	22	26	423
	1390,85	0,73	0,01	0,15	0,36	0,16	21,62	6,25	21	49	429
	1394,15	0,93	0,01	0,24	0,17	0,25	26,73	4,00	26	18	427
	1453,45	1,35	0,09	1,76	1,40	1,85	137,04	4,86	131	103	438
Strunien	1454,35	1,14	0,03	1,28	0,17	1,31	115,15	2,29	112	15	433
	1458,00	1,79	0,09	2,84	0,16	2,93	163,84	3,07	159	9	438
	1508,90	1,37	0,11	1,73	0,16	1,84	134,15	5,98	126	12	431
	1511,80	1,42	0,09	2,04	0,24	2,13	149,86	4,23	143	17	438
	1516,55	1,19	0,02	1,31	0,16	1,33	111,77	1,50	110	13	433
	1529,55	3,68	0,14	11,21	0,43	11,35	308,54	1,23	305	12	436
	1533,55	2,54	0,10	6,45	0,76	6,56	258,10	1,53	254	30	433
	1535,80	0,81	0,07	1,40	0,30	1,46	181,38	4,76	173	37	438

Tableau 23 : Teneurs en carbone organique et valeurs des différents paramètres tirés de l'analyse en pyrolyse Rock-Eval des sédiments bruts du sondage LTNW-1. (voir légende plus haut)

ANNEXE IV: LISTE DES FIGURES,
TABLEAUX ET PLANCHES

FIGURES

- 1- Principaux éléments structuraux de la plateforme saharienne
- 2- Coupe géologique schématisque à travers le Sahara Occidental
- 3- Ecorché mésozoïque simplifié de l'ouest africain
- 4- Localisation de la zone étudiée au sein du bassin de Sbaa
- 5- Situation des sondages étudiés et des coupes établies dans le bassin de Sbaa
- 6- Coupe géologique schématisque au nord du bassin de Sbaa et résultats pétroliers
- 7- Coupe géologique schématisque au sud du bassin de Sbaa et résultats pétroliers
- 8- Coupe géologique schématisque au niveau de la voûte d'Azzène
- 9- Coupe lithostratigraphique synthétique de la cuvette de Sbaa
- 10- Principales étapes de l'enfouissement de la base de l'Ordovicien en fonction du temps géologique dans le bassin de Sbaa
- 11- Principaux axes de subsidence dans le Sahara algérien
- 12- Protocole expérimental de l'étude analytique des sédiments de la cuvette de Sbaa
- 13- Dispositif I.F.P. pour l'isolement du kérogène
- 14- Protocole d'étude des Tasmanacées du Silurien du sondage OTLA-1
- 15- Diagramme H/C-O/C des kératogènes et charbons des différentes séries de référence
- 16- Schéma général de l'évolution de la matière organique en fonction de la profondeur
- 17- Evolution du paramètre QF-535 et des altérations spectrales des Tasmanacées en fonction de la profondeur
- 18- Evolution du paramètre QF-535 en fonction de l'extrait chloroformique et des pourcentages pondéraux des différentes fractions de cet extrait
- 19- Evolution du paramètre QF-535 et des altérations monochromatiques en fonction de la profondeur
- 20- Teneurs en carbone organique des sédiments bruts en fonction de la profondeur
- 21- Evolution de l'Index d'Hydrogène des sédiments bruts en fonction de la profondeur
- 22- Index d'Oxygène des sédiments bruts en fonction de la profondeur
- 23- Evolution du Tmax des sédiments bruts en fonction de la profondeur
- 24- Position des échantillons de roche brute du Tournaisien dans un diagramme IH-IO

- [illegible]

- 53- Distribution quantitative des n-alcanes et des isoprénoïdes en fonction de leur nombre d'atomes de carbone dans les sédiments du bassin de Sbaa
- 54- Chromatogrammes des huiles brutes provenant de 3 niveaux réservoirs dans le bassin de Sbaa
- 55- Pourcentages pondéraux des hydrocarbures saturés, des hydrocarbures aromatiques et des résines dans la fraction > 210°C des huiles provenant de 3 niveaux réservoirs dans le bassin de Sbaa
- 56- Composition de l'huile du sondage Sbaa-1 et résultats de la chromatographie gazeuse des HC saturés correspondants
- 57- Composition de l'huile du sondage LT-1 et résultats de la chromatographie gazeuse des HC saturés correspondants
- 58- Composition de l'huile du sondage TOT-1 et résultats de la chromatographie gazeuse des HC saturés correspondants
- 59- • Comparaison des courbes de pyrolyse observées et calculées par le modèle cinétique, des Tasmanacées du Silurien du bassin de Sbaa
 • Distribution des énergies d'activation concernant le modèle cinétique, des Tasmanacées du Silurien du bassin de Sbaa
- 60- Comparaison entre le chromatogramme des HC saturés d'une huile de réservoir (Tournaisien du sondage Sbaa-1) et le pyrogramme des HC saturés de Tasmanacées (Silurien du sondage OTLA-1)
- 61- Altération spectrale (SS94TAST)
- 62- Altération spectrale (SS94TT)
- 63- • Schéma de principe du Rock-Eval II
 • Les différentes fractions étudiées de la matière organique totale des roches, les paramètres correspondants et leurs enregistrements suivant le type d'appareil utilisé
- 64- Schéma du pyrochromatographe type "Microfour Girdel"

TABLEAUX

- 1- Résultats de l'étude réflectométrique des sédiments du Tournaisien et du Strunien du sondage Sbaa-1
- 2- Paramètres spectraux tirés de l'analyse microfluorimétrique des Algues Tasmanacées
- 3- Résultats de l'analyse élémentaire et rapports atomiques des kérogènes extraits (KC)
- 4- Teneurs en carbone organique et valeurs des différents paramètres tirés de l'analyse en pyrolyse Rock-Eval des kérogènes bruts des sédiments paléozoïques de la cuvette de Sbaa
- 5- Attribution des principales bandes d'absorption de la lumière infrarouge des kérogènes
- 6- Valeurs des coefficients d'absorption (unités arbitraires de surface rapportées à 1 mg de carbone organique) relatives à la bande à 2960 cm⁻¹ et des Index d'Hydrogène (IH) des kérogènes extraits (KC) du bassin de Sbaa

7- Composition des extraits chloroformiques totaux des sédiments du bassin de Sbaa

8- Teneur en extrait chloroformique total et en asphaltènes des sédiments du bassin de Sbaa

9- Composition des extraits chloroformiques des kérogènes bruts (KB) des sédiments du bassin de Sbaa

10- Résultats de l'analyse élémentaire du concentré de Tasmanacées du Silurien et du résidu solide récupéré après pyrolyse en milieu confiné de ces Algues et extraction chloroformique

11- Résultats de la pyrolyse Rock-Eval du concentré de Tasmanacées du Silurien du sondage OTLA-1

12- Quantités (mg/g MOT initiale) et pourcentages des différentes fractions issues de la pyrolyse en milieu confiné à l'isotherme 322°C pendant 48h

13- Rendement en composés C15+ de la pyrolyse préparative. Composition du pyrolysât

14 à 23- Teneurs en carbone organique et valeurs des différents paramètres tirés de l'analyse en pyrolyse Rock-Eval des sédiments bruts du sondage

- | | | | | |
|--------------|----------------|---------------|--------------|--------------|
| ● 14: Sbaa-1 | ● 15: Sbaa N-1 | ● 16: Sbaa-2A | ● 17: Sbaa-3 | ● 18: ODZ-1 |
| ● 19: AZNW-1 | ● 20: OTLA-1 | ● 21: LT-1 | ● 22: LT-2 | ● 23: LTNW-1 |

PLANCHES

I- Tasmanacées du Silurien du bassin de Sbaa (sondage OTLA-1)

II- Aspect microscopique du contenu organique des sédiments du bassin de Sbaa (sondage Sbaa-1)

III- Aspect microscopique du contenu organique des sédiments du bassin de Sbaa

IV- Principales spores du Tournaisien, du Strunien et du Givétien du bassin de Sbaa observées en lumière transmise

V- Principales formes planctoniques du Strunien et du Silurien du bassin de Sbaa observées en lumière transmise

